

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO REAL DE LA FASE III DE LA CURVA DE LA  
BAÑERA A TRAVÉS DE LA APROXIMACIÓN DE UNA DISTRIBUCIÓN A LA  
VIDA ÚTIL DE BOMBILLOS DE FRENADO AUTOMOTRIZ

JORGE ALBERTO AMAYA CATAÑO

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
MEDELLÍN

2014



ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO REAL DE LA FASE III DE LA CURVA DE LA  
BAÑERA A TRAVÉS DE LA APROXIMACIÓN DE UNA DISTRIBUCIÓN A LA  
VIDA ÚTIL DE BOMBILLOS DE FRENADO AUTOMOTRIZ

JORGE ALBERTO AMAYA CATAÑO

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN INGENIERÍA

ASESOR

PhD. LUIS ALBERTO MORA GUTIERREZ

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MEDELLÍN

2014

## CONTENIDO

CONTENIDO .....	4
ILUSTRACIONES .....	8
TABLAS .....	9
ECUACIONES .....	9
0 PRÓLOGO .....	10
0.1 INTRODUCCIÓN .....	10
0.2 ANTECEDENTES .....	10
0.3 JUSTIFICACIÓN .....	11
0.4 OBJETIVOS .....	11
0.4.1 GENERAL .....	11
0.4.2 ESPECÍFICOS .....	11
0.4.2.1 Uno .....	11
0.4.2.2 Dos .....	12
0.4.2.3 Tres .....	12
0.4.2.4 Cuatro .....	12
0.4.2.5 Cinco .....	12
1 FUNDAMENTOS .....	13
1.1 OBJETIVO DE CAPITULO 1 .....	13
1.2 INTRODUCCION A CAPITULO 1 .....	13
1.3 DESARROLLO .....	13
1.3.1 Distribuciones de probabilidad .....	13
1.3.1.1 Tipos de distribuciones de probabilidad .....	13
1.3.2 Selección y aplicación de distribuciones de acuerdo a la tasa de fallas ...	14
1.3.3 Distribuciones para la tercera fase de la curva de Davies o de la bañera	15
1.3.4 Fundamentación técnica de las distribuciones que gobiernan los ciclos de vida útil, confiabilidad y fallas de elementos no reparables. ....	17
1.3.5 Fundamentos de la distribución Weibull .....	18
1.3.5.1 Parámetros de la distribución Weibull .....	19
1.3.5.2 Funciones continuas en Weibull .....	20
1.3.5.3 Parámetros de vida útil o Tiempo Medio entre Fallas en Weibull .....	21
1.3.6 Fundamentos de la distribución Normal .....	21
1.3.6.1 Funciones continuas en Normal .....	22
1.3.6.2 Parámetros de vida útil o Tiempo Medio entre Fallas en Normal .....	23
1.4 CONCLUSIONES DE CAPITULO .....	23
2 RECONOCIMIENTO .....	24
2.1 OBJETIVO DE CAPITULO 2 .....	24
2.2 INTRODUCCION A CAPITULO 2 .....	24
2.3 DESARROLLO .....	24
2.4 TERMINOLOGÍA Y FUNDAMENTACIÓN PARA LOS ELEMENTOS NO REPARABLES .....	24
2.4.1 Confiabilidad .....	24

2.4.1.1	Funciones principales y secundarias:.....	24
2.4.1.2	Condiciones de trabajo.....	25
2.4.1.3	Intervalo.....	25
2.4.2	Disponibilidad .....	25
2.4.3	Tasa de fallo $\lambda$ (t).....	25
2.4.4	Magnitudes en función del tiempo medio.....	25
2.4.4.1	MTTF o MTFF .....	25
2.4.4.2	MTBF.....	25
2.4.4.3	MDT.....	26
2.4.4.4	MTTR .....	26
2.4.5	Tipos de Fallas o defectos .....	26
2.4.5.1	Físicos (Averías).....	26
2.4.5.2	Diseño .....	26
2.4.5.3	Utilización .....	26
2.5	ELEMENTOS NO REPARABLES.....	27
2.6	BOMBILLA DE FILAMENTO INCANDESCENTE .....	28
2.6.1	Historia y estado del arte .....	28
2.6.2	Funcionamiento y partes.....	29
2.6.2.1	Filamento.....	29
2.6.2.2	Gas inerte .....	29
2.6.2.3	Bulbo .....	29
2.6.2.4	Base .....	30
2.6.3	Materiales .....	30
2.6.3.1	Bulbo .....	30
2.6.3.2	Filamento.....	31
2.6.3.3	Gas inerte .....	31
2.6.4	Aplicaciones.....	31
2.6.5	Causas de falla .....	32
2.6.5.1	Vibraciones.....	32
2.6.5.2	Voltaje excesivo.....	32
2.6.5.3	Soporte de conexión incorrecto .....	32
2.6.5.4	Intermitencia .....	32
2.7	BOMBILLA DE LED .....	33
2.7.1	Historia y estado del arte .....	33
2.7.2	Funcionamiento y partes.....	33
2.7.2.1	Ánodo .....	34
2.7.2.2	Cátodo.....	34
2.7.2.3	Chip semiconductor .....	34
2.7.2.4	Reflector .....	34
2.7.2.5	Lente y protector.....	35
2.7.3	Tipos de led .....	35
2.7.3.1	Encapsulado.....	35
2.7.3.2	SMD .....	35
2.7.3.3	OLED.....	35
2.7.4	Materiales .....	35

2.7.5	Aplicaciones.....	36
2.7.6	Causas de falla .....	37
2.7.6.1	Fallas en el chip.....	38
2.7.6.2	Construcción interna del LED .....	38
2.7.6.3	Ensamble del LED .....	38
2.8	CONCLUSIONES DE CAPÍTULO.....	38
3	APLICACIÓN.....	39
3.1	OBJETIVO DE CAPITULO 3 .....	39
3.2	INTRODUCCION A CAPITULO 3 .....	39
3.3	BANCO DE PRUEBAS .....	39
3.3.1	Bombillos .....	39
3.3.1.1	Tipos.....	39
3.3.1.2	Marcas.....	39
3.3.1.3	Precios.....	40
3.3.1.4	Selección de los bombillos .....	41
3.3.2	Portalámparas .....	42
3.3.2.1	Plástico para empotrar .....	42
3.3.2.2	Metálico con platina para atornillar .....	42
3.3.2.3	Selección del portalámparas .....	43
3.3.3	Componentes eléctricos .....	43
3.3.3.1	Transformador .....	43
3.3.3.2	Platinas para conducción de corriente.....	47
3.3.3.3	Breakers .....	47
3.3.3.4	Puentes Rectificadores.....	47
3.3.3.5	Condensadores .....	48
3.3.4	Componentes electrónicos y controladores .....	49
3.3.4.1	Microcontrolador .....	49
3.3.4.2	Relés .....	50
3.3.4.3	Transistores.....	51
3.3.4.4	Resistencias .....	52
3.3.4.5	Diodos .....	52
3.3.4.6	Circuito impreso.....	52
3.3.5	Diseño y construcción banco de pruebas y de caja de circuitos.....	54
3.3.5.1	Diseño y construcción del marco.....	56
3.3.5.2	Diseño y construcción de caja de circuitos.....	57
3.3.6	Funcionamiento de la tarjeta electrónica para el control de encendido ....	58
3.3.6.1	Pruebas preliminares.....	58
3.3.6.2	Conexión y funcionamiento del control de encendido de los bombillos Incandescentes y LED .....	59
3.3.7	Control de encendido y apagado .....	63
3.3.7.1	Parámetros de tiempos de accionamiento .....	63
3.3.7.2	Algoritmo de control.....	64
3.3.8	Banco de pruebas Completo y a punto para iniciar pruebas .....	66
3.4	EXPEDIENTE DE FALLAS DE BOMBILLOS DURANTE LA EXPERIMENTACIÓN .....	68

3.4.1	Expediente de fallas bombillos de filamento .....	68
3.4.2	Expediente de fallas bombillos LED .....	70
3.5	CONCLUSIONES DE CAPÍTULO.....	72
4	ANÁLISIS .....	73
4.1	OBJETIVO DE CAPITULO 4 .....	73
4.2	INTRODUCCION CAPITULO 4 .....	73
4.3	DESARROLLO.....	73
4.3.1	Validez estadística.....	74
4.3.2	Análisis de resultados iniciales .....	82
4.3.2.1	Estudio de los bombillos incandescentes de Lote Inicial Ciclo 1 con Weibull del Programa Base CMD & CMD Múltiple.....	82
4.3.2.2	Estudio de los bombillos incandescentes de Lote Inicial Ciclo 1 y 2, juntos con Programa BaseCMD.....	87
4.3.2.3	Estudio de los bombillos LED con Programa BaseCMD & CMD Múltiple 92	
4.3.2.4	Estudio de los bombillos incandescentes de Lote Inicial Ciclo 1 con distribución Weibull del Programa ReliaSoft Weibull ++ Versión 6 .....	95
4.3.2.5	Estudio de los bombillos incandescentes de Lote Inicial Ciclos 1 y 2 con distribución Weibull del Programa ReliaSoft Weibull ++ Versión 6 .....	98
4.3.2.6	Estudio de los bombillos LED con distribución Weibull del Programa ReliaSoft Weibull ++ Versión 6 .....	100
4.3.2.7	Estudio de los bombillos incandescentes de Lote Inicial Ciclo 1, Ciclo 2 y LED con programa Statgraphics Centurión XV con Distribución Weibull.....	103
4.3.3	Análisis cruzado.....	105
4.4	CONCLUSIONES DE CAPÍTULO.....	105
5	CONCLUSIONES.....	106
5.1	CONCLUSIONES DERIVADAS DEL BANCO DE PRUEBAS .....	106
5.2	CONCLUSIONES TÉCNICAS .....	106
5.3	CONCLUSIONES GENERALES.....	108
	BIBLIOGRAFÍA.....	110

## ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1 - SECUENCIA LÓGICA DE OBJETIVOS.....	12
ILUSTRACIÓN 2 - BANDA DE APLICACIÓN DE DISTRIBUCIONES A LA CURVA DE LA BAÑERA .....	16
ILUSTRACIÓN 3 - CURVA DE LA BAÑERA O DAVIES.....	18
ILUSTRACIÓN 4 - MAGNITUDES EN FUNCIÓN DEL TIEMPO MEDIO (SCHNEIDER ELECTRIC, 2000).....	26
ILUSTRACIÓN 5 - PARTES BOMBILLA FILAMENTO.....	30
ILUSTRACIÓN 6 - PARTES BOMBILLA LUZ DE FRENO VEHÍCULO .....	30
ILUSTRACIÓN 7 - PARTES LED .....	34
ILUSTRACIÓN 8 - MATERIALES DEL SEMICONDUCTOR Y SU COLOR .....	36
ILUSTRACIÓN 9 - APLICACIONES LED .....	37
ILUSTRACIÓN 10 - PANTALLA LED MONOCROMÁTICA - PANTALLA GIGANTE LED.....	37
ILUSTRACIÓN 11 - FICHA TÉCNICAS DE ALGUNOS BOMBILLOS .....	40
ILUSTRACIÓN 12 - BASE BOMBILLO FRENO LUZ FRENO VEHICULO.....	42
ILUSTRACIÓN 13 - BASE BOMBILLO FRENO LUZ FRENO VEHÍCULO.....	42
ILUSTRACIÓN 14 - BASE BOMBILLO FRENO LUZ FRENO VEHÍCULO.....	43
ILUSTRACIÓN 15 - GRÁFICA DE CONSUMO BOMBILLOS DE FILAMENTO .....	45
ILUSTRACIÓN 16 - GRÁFICA DE CONSUMO BOMBILLOS LED.....	45
ILUSTRACIÓN 17 - BREAKER.....	47
ILUSTRACIÓN 18 - RECTIFICACIÓN DE ONDA SINUSOIDAL DE CORRIENTE ALTERNA.....	48
ILUSTRACIÓN 19 - PUENTE RECTIFICADOR DE CORRIENTE.....	48
ILUSTRACIÓN 20 - CONDENSADORES .....	49
ILUSTRACIÓN 21 - ARDUINO® MEGA2560.....	49
ILUSTRACIÓN 22 - PLANO ESQUEMÁTICO DEL ARDUINO.....	50
ILUSTRACIÓN 23 - RELÉ.....	50
ILUSTRACIÓN 24 - TRANSISTOR TIP 121 .....	51
ILUSTRACIÓN 25 - TRANSISTOR 2N2222.....	51
ILUSTRACIÓN 26 - RESISTENCIAS.....	52
ILUSTRACIÓN 27 - DIODO .....	52
ILUSTRACIÓN 28 - CAPAS SUPERIOR E INFERIOR CIRCUITO IMPRESO.....	53
ILUSTRACIÓN 29 - DIAGRAMA DE CONEXIÓN BANCO DE PRUEBAS.....	55
ILUSTRACIÓN 30 - PLANOS MARCO BANCO DE PRUEBAS .....	56
ILUSTRACIÓN 31 - IMÁGENES CONSTRUCCIÓN MARCO BANCO DE PRUEBAS.....	57
ILUSTRACIÓN 32 - PLANO DE ENSAMBLE DE LA CAJA DE LOS COMPONENTES ELÉCTRICOS.....	58
ILUSTRACIÓN 33 - IMÁGENES PRUEBAS PRELIMINARES .....	59
ILUSTRACIÓN 34 - ESQUEMA DE CONEXIÓN DEL CONTROL DE ENCENDIDO DE LOS BOMBILLOS INCANDESCENTES .....	60
ILUSTRACIÓN 35 - ESQUEMA DE CONEXIÓN DEL CONTROL DE ENCENDIDO DE LOS BOMBILLOS LED .....	60
ILUSTRACIÓN 36 - CIRCUITO IMPRESO CON MARCACIÓN DE COMPONENTES.....	61
ILUSTRACIÓN 37 - TARJETA ELECTRÓNICA - ENSAMBLE ELEMENTOS ELECTRONICOS.....	62
ILUSTRACIÓN 38 - PLANO ELÉCTRICO DE TODO EL CIRCUITO .....	62
ILUSTRACIÓN 39 - DISTANCIAS DE FRENADO A DIFERENTES VELOCIDADES .....	63
ILUSTRACIÓN 40 - TIEMPO DE FRENADO A DIFERENTES VELOCIDADES.....	64
ILUSTRACIÓN 41 - CICLO DE ACCIONAMIENTO BOMBILLOS INCANDESCENTES.....	65
ILUSTRACIÓN 42 - CICLO DE ACCIONAMIENTO BOMBILLOS LED.....	66
ILUSTRACIÓN 43 - ALGORITMO DE ACCIONAMIENTO DE BOMBILLOS.....	66
ILUSTRACIÓN 44 - BANCO DE PRUEBAS EN FUNCIONAMIENTO .....	67
ILUSTRACIÓN 45 - AISLAMIENTO Y SEÑALIZACIÓN BANCO DE PRUEBAS.....	67
ILUSTRACIÓN 46 - FILAMENTO NUEVO BOMBILLO INCANDESCENTE .....	68
ILUSTRACIÓN 47 - FILAMENTO DAÑADO BOMBILLO INCANDESCENTE.....	69
ILUSTRACIÓN 48 - PÉRDIDA DE LUMINISCENCIA BOMBILLO LED .....	70
ILUSTRACIÓN 49 - BOMBILLO LED NUEVO .....	71
ILUSTRACIÓN 50 - IMÁGENES DE BOMBILLOS LED CON FALLAS POR TEMPERATURA .....	71
ILUSTRACIÓN 51 - CURVA TIPIFICADA DE DAVIES .....	73
ILUSTRACIÓN 52 - BOMBILLOS INCANDESCENTES Y LED S EN ESTADO DE FALLA.....	74
ILUSTRACIÓN 53 - SEGUNDO CICLO DE LOS INCANDESCENTES.....	76
ILUSTRACIÓN 54 - INCANDESCENTES CICLO 1 DE 100 MÁS CICLO 2 A LA FECHA - FALLIDAS .....	77



ILUSTRACIÓN 55 - ESTADÍSTICA BÁSICA INCANDESCENTES CICLO 1 -TODO CICLO 1, 2 Y LED S .....	78
ILUSTRACIÓN 56 - TAMAÑO MUESTRAL CON CICLO 1, CICLO 2 INCANDESCENTES Y LED.....	78
ILUSTRACIÓN 57 - PRUEBA COEFICIENTE CRONBACH A LAS TRES MUESTRAS CICLO 1 – 2 Y LED .....	81
ILUSTRACIÓN 58 - PRUEBAS ACF TRES MUESTRAS .....	81
ILUSTRACIÓN 59 - COMPORTAMIENTO BOMBILLOS CICLO 1 WEIBULL Y AJUSTE K-S Y A-D .....	83
ILUSTRACIÓN 60 - CURVAS DE CICLO 1 CON BASECMD DE DISTRIBUCIÓN NORMAL.....	86
ILUSTRACIÓN 61 - COMPORTAMIENTO BOMBILLOS CICLOS 1 Y 2 WEIBULL Y AJUSTE K-S Y A-D.....	87
ILUSTRACIÓN 62 - CURVAS DE CICLOS 1 Y 2 CON BASECMD DE DISTRIBUCIÓN NORMAL .....	91
ILUSTRACIÓN 63 - COMPORTAMIENTO BOMBILLOS LED WEIBULL Y AJUSTE K-S Y A-D.....	92
ILUSTRACIÓN 64 - CURVAS DE LED CON BASECMD DE DISTRIBUCIÓN NORMAL .....	94
ILUSTRACIÓN 65 - ANÁLISIS BOMBILLOS CICLO 1 WEIBULL RELIASOFT WEIBULL ++ VERSIÓN 6 .....	95
ILUSTRACIÓN 66 - ANÁLISIS CICLO 1 DISTRIBUCIÓN NORMAL RELIASOFT WEIBULL ++VERSIÓN 6.....	97
ILUSTRACIÓN 67 - ANÁLISIS BOMBILLOS CICLOS 1 - 2 WEIBULL RELIASOFT WEIBULL++VERSIÓN 6 .....	98
ILUSTRACIÓN 68 - ANÁLISIS DE CICLOS 1 Y 2 CON DISTRIBUCIÓN NORMAL DE RELIASOFT WEIBULL ++ VERSIÓN 6 .....	100
ILUSTRACIÓN 69 - ANÁLISIS BOMBILLOS LED CON WEIBULL DE RELIASOFT WEIBULL++ VERSIÓN 6 .....	101
ILUSTRACIÓN 70 - ANÁLISIS DE LED CON DISTRIBUCIÓN NORMAL DE RELIASOFT WEIBULL ++ VERSIÓN 6 .....	103
ILUSTRACIÓN 71 - INCANDESCENTES CICLO 1 CON ANÁLISIS WEIBULL DE STATGRAPHICS.....	103
ILUSTRACIÓN 72 - INCANDESCENTES CICLOS 1 Y 2 CON ANÁLISIS WEIBULL DE STATGRAPHICS .....	104
ILUSTRACIÓN 73 - BOMBILLOS CON ANÁLISIS WEIBULL DE STATGRAPHICS .....	104
ILUSTRACIÓN 74 – BANCO DE PRUEBAS EN FUNCIONAMIENTO.....	106
ILUSTRACIÓN 75 - UBICACIÓN EN CURVA DE DAVIES DE LOS BOMBILLOS DE FRENADO AUTOMOTRIZ .....	108

## TABLAS

TABLA 1 - INTERPRETACIÓN PARÁMETRO DE FORMA BETA DE WEIBULL.....	19
TABLA 2 - POTENCIA DE CONSUMO BOMBILLO INCANDESCENTE .....	44
TABLA 3 - POTENCIA DE CONSUMO BOMBILLO LED .....	45
TABLA 4 - CONSUMO DE CORRIENTE TOTAL DEL SISTEMA .....	46
TABLA 5 - ESPECIFICACIONES DEL TRANSFORMADOR.....	47
TABLA 6 - TIEMPO DE DURACIÓN DE LAS BOMBILLAS DE VEHÍCULO.....	109

## ECUACIONES

ECUACIÓN 1 - FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN VARIABLE ALEATORIA X .....	13
ECUACIÓN 2 - FUNCIÓN DE MASA DE PROBABILIDAD.....	14
ECUACIÓN 3 - FUNCIÓN DE DENSIDAD .....	14
ECUACIÓN 4 - FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD.....	20
ECUACIÓN 5 - FUNCIÓN DE CONFIABILIDAD O SUPERVIVENCIA .....	20
ECUACIÓN 6 - FUNCIÓN ACUMULATIVA DE FALLAS O DE DISTRIBUCIÓN .....	20
ECUACIÓN 7 - FUNCIÓN DE TASA DE FALLAS O RIESGO .....	21
ECUACIÓN 8 - <i>MTBF</i> WEIBULL.....	21
ECUACIÓN 9 - FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD.....	22
ECUACIÓN 10 - FUNCIONES DE CONFIABILIDAD EN D.NORMAL .....	23
ECUACIÓN 11 - FUNCION ACUMULATIVA DE FALLAS EN D.NORMAL.....	23
ECUACIÓN 12 - FUNCION TASA DE FALLAS EN DISTRIBUCIÓN NORMAL.....	23
ECUACIÓN 13 - <i>MTBF</i> NORMAL .....	23

## 0 PRÓLOGO

### 0.1 INTRODUCCIÓN

La curva de Davies refleja el comportamiento de la Rata o Tasa de fallas  $\lambda$  de los elementos en funcionamiento, también recibe el nombre de curva de la bañera, en inglés *Bathroom*, en honor a su creador el Médico Ingles Davies, cuyo objetivo es ilustrar gráficamente la tasa de mortalidad de los seres humanos; este grafico toma el papel de uno de las más importantes referentes sobre el comportamiento de la vida útil de los diferentes sistemas, maquinas o equipos existentes. La forma que describe la gráfica forma una curva que se asemeja a una bañera, de allí su nombre, en la cual se enmarcan tres fases, mortalidad infantil, madurez o rodaje y envejecimiento.

El mantenimiento industrial toma como pie fundamental, el estudio constante de los equipos que representan el capital y la generación de ingresos, en temas de producción o de los activos de las empresa, con el fin de obtener el mayor beneficio posible; para lograr dicho objetivo se realizan los análisis y cálculos de CMD para los equipos críticos con los que las organizaciones cuentan en particular y, a partir de estos datos y el uso de metodologías de distribuciones como Weibull, Hjorth, Normal, Log Normal y Exponencial entre otras, se encuentran indicadores que ubican al sistema o equipo en algún punto de la curva de Davies (Mora, 2012).

La ubicación de un equipo en la curva de Davies, proporciona información sobre la etapa de vida útil en la que se encuentra el equipo; con esto se definen el tipo de actividades y planes de mantenimiento, pertinentes que se deben realizar.

Los equipos no necesariamente atraviesan, las tres zonas de Davies, en la actualidad se fabrican equipos y maquinas que no recorren toda la curva o inician esta desde un punto intermedio, así como otros comienzan en la fase inmediatamente de desgaste; en este punto es donde se encuentran los elementos que se denominan no reparables, los cuales son partes o componentes que comúnmente se encuentran dentro de sistemas complejos o son máquinas o elementos que su reparación es más costosa que la fabricación de uno nuevo.

Los elementos no reparables en cuanto inician su ciclo de vida, comienzan un proceso de desgaste y según la teoría, dichos elementos continúan su trabajo hasta que por motivos de envejecimiento y deterioro, pierden parcialmente o totalmente su funcionalidad, esta premisa define estos elementos como ocupantes de la fase número tres de curva de la bañera donde los fallos de los equipos se presentan por el envejecimiento.

### 0.2 ANTECEDENTES

Toda empresa que desempeña la realización de bienes y/o servicios, utiliza instalaciones, edificios, máquinas, equipos, herramientas, utensilios, dispositivos, y otros, para cumplir con la misión corporativa. Las empresas productoras necesitan

que estos activos se mantengan con unos buenos indicadores de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, conforme a sus necesidades. Por lo cual, las organizaciones empresariales buscan un costo del ciclo de vida (LCC)<sup>1</sup> mínimo y una vida útil máxima de los equipos (Mora, 2009).

Los estudios de confiabilidad arrojan un importante aporte entorno a la legendaria curva de la bañera. Conocer la zona tres en la cual los elementos presentan mayor desgaste e identificar comportamiento de factores propios de las distribuciones permite distinguir una parte importante del ciclo de vida de un elemento.

### 0.3 JUSTIFICACIÓN

La predicción de indicadores CMD y el análisis de la conducta de la tasa de falla de los sistemas técnicos, se realiza por diferentes métodos, entre los que predomina por practicidad y fundamento técnico el uso de distribuciones estadísticas.

Entre las distribuciones estadísticas se encuentran Weibull, Hjorth, Normal, Log Normal y Exponencial, entre otras; todas estas con características particulares que las distingue para usarse en ocasiones particulares para obtener mejores resultados, sin embargo, dentro de las particularidades que algunas tienen, es que se usan independientes de la zona de la curva de la bañera y de la naturaleza de las fallas, por lo que se pueden utilizar en cualquiera que sea el punto en el que se encuentra en su vida útil el sistema técnico.

El desarrollo de esta investigación plantea principios, criterios y la aplicación de algunas de las distribuciones estadísticas a un sistema no reparable, en este caso bombillos de frenado en vehículos, con el fin de encontrar cual modela mejor este tipo de sistema en mantenimiento y evitar posibles resultados ambiguos en la utilización de cualquier distribución.

### 0.4 OBJETIVOS

El proyecto propende alcanzar las siguientes metas:

#### 0.4.1 GENERAL

Analizar el comportamiento de la vida útil de bombillos de freno automotrices, con el fin de tratar de encontrar la mejor distribución estadística que la modele.

#### 0.4.2 ESPECÍFICOS

##### 0.4.2.1 Uno

Definir los principios fundamentales de las distribuciones estadísticas que atienden

---

<sup>1</sup> LCC: Life Cycle Cost.

la tercera fase de la curva de Davies de mantenimiento “Envejecimiento”. – Nivel 1 – Conocer.

#### 0.4.2.2 Dos

Describir las características de vida útil del comportamiento de los elementos que se ubican en la fase III de la curva de Davies. – Nivel 2 – Comprender.

#### 0.4.2.3 Tres

Registrar el proceso y cifras de vida útil experimental de la investigación sobre bombillos de señal de freno en automotores. . – Nivel 3 – Aplicar.

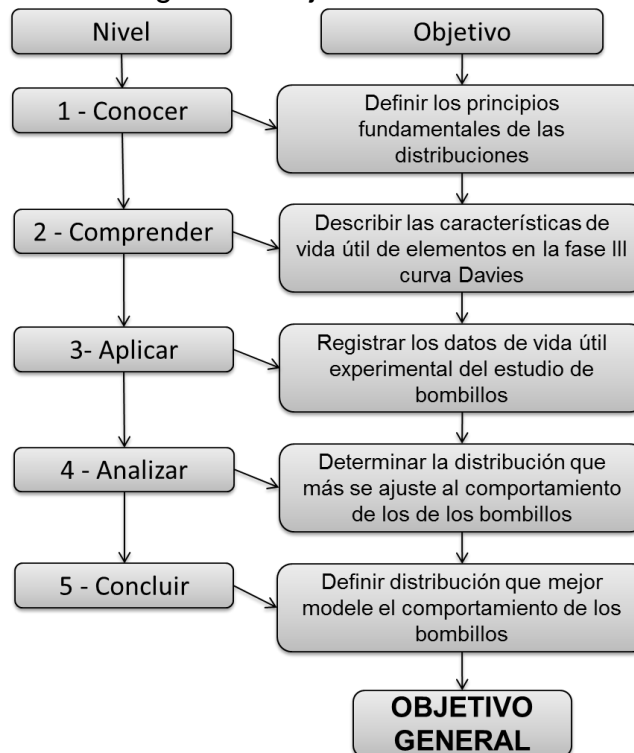
#### 0.4.2.4 Cuatro

Determinar la distribución que más se ajuste al comportamiento de los bombillos del proyecto de la investigación Bombillos fase tres curva de Davies GEMI 2013. - Nivel 4 – Analizar.

#### 0.4.2.5 Cinco

Concluir las principales observaciones y resultados en el proceso investigativo.

Ilustración 1 - Secuencia Lógica de Objetivos



(Gagné@, y otros, 2008)

## 1 FUNDAMENTOS

### 1.1 OBJETIVO DE CAPITULO 1

Definir los principios fundamentales de las distribuciones estadísticas que atienden la tercera fase de la curva de Davies de mantenimiento “envejecimiento”.

### 1.2 INTRODUCCION A CAPITULO 1

El proyecto desarrolla el plan inicial, tal cual se plantea en los objetivos, con una parte de fundamentación técnica, una experimental y finalmente la fase estadística y de distribuciones, donde se prueba la hipótesis de que los bombillos superviven hasta la fase de envejecimiento de Fase III de Davies. Esta sección en especial fundamenta los conceptos básicos de las distribuciones estadísticas.

### 1.3 DESARROLLO

#### 1.3.1 Distribuciones de probabilidad

La teoría de la probabilidad expresa que una función que determine la probabilidad de que ocurra un evento específico sobre una variable aleatoria, se le conoce como distribución de probabilidad de una variable aleatoria.

La función de distribución específica, la distribución de probabilidad, cuyo valor en cada  $x$  real es la probabilidad de que la variable aleatoria sea menor o igual que  $x$ .

Dada una variable aleatoria  $x$ , su función de distribución,  $FX(x)$  es:

Ecuación 1 - Función de distribución variable aleatoria  $x$

$$FX(x) = Probabilidad(X \leq x)$$

Por simplicidad, cuando no hay lugar a confusión, suele omitirse el subíndice  $x$  y se escribe, simplemente  $F(x)$  (Forbes, y otros, 2011).

#### 1.3.1.1 Tipos de distribuciones de probabilidad

Existen dos tipos de distribuciones de probabilidad: discretas y continuas.

##### 1.3.1.1.1 Distribuciones de variable discreta

Aquella cuya función de probabilidad sólo toma valores positivos en un conjunto de valores finito o infinito se le conoce como distribución de variable discreta.

También se conoce como función de masa de probabilidad. La distribución de probabilidad es la sumatoria de la función de masa, descrita por la siguiente fórmula:

Ecuación 2 - Función de masa de probabilidad

$$FX(x) = Probabilidad(X \leq x) = \sum_{k=-\infty}^x f(k)$$

Este enunciado significa la suma de todas las probabilidades desde  $-\infty$  hasta el valor  $x$ .

Entre las distribuciones de este tipo más importantes se encuentran: Geométrica - Hipergeométrica - Bernoulli - Rademacher - Binomial - Binomial negativa - Distribución Poisson.

#### 1.3.1.1.2 Distribuciones de variable continua

Aquella función que puede tomar cualquiera de los infinitos valores existentes dentro de un intervalo se le conoce como distribución de variable continua.

También se denomina ( $f$  minúscula) función de densidad, dicha distribución de variable continua, es la integral de la función de densidad, descrita la siguiente fórmula:

Ecuación 3 - Función de densidad

$$FX(x) = Probabilidad(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(t)dt$$

Entre las distribuciones de este tipo más importantes se encuentran: Normal, Gamma, Weibull, Pareto, Chi Ji Cuadrado, Exponencial y la *t Student* (Forbes, y otros, 2011).

#### 1.3.2 Selección y aplicación de distribuciones de acuerdo a la tasa de fallas

Las diferentes acciones a realizar por parte de mantenimiento se rigen entre varios factores por la curva de la bañera, que muestra la evolución en el tiempo frente a la tasa de fallas y el valor del parámetro de forma Beta del equipo que se evalúa; acorde a su valor para ese momento del equipo, se decide, si las tareas de mantenimiento deben ser correctivas, modificativas, preventivas o predictivas.

Cuando se requiere desarrollar estrategias y acciones concretas de mantenimiento y producción, definitivamente es mejor utilizar las distribuciones para el análisis de la confiabilidad (Lewis, 1995) y la mantenibilidad.

El modo en que se seleccionan las actividades de mantenimiento de acuerdo al sitio en que se ubica un sistema o elemento en la curva de la bañera, se basa en el análisis de los datos con distribuciones, con punto de partida en un primer estudio con alguna distribución que se acomode a todas las fases de la curva (Leemis, 1995) y a partir de los valores que toman los parámetros de esta distribución, se define en que sección de la curva se encuentra el sistema o elemento en análisis.

Según los valores de los parámetros del primer estudio, se define el comportamiento de la fase a analizar de la curva, y se selecciona algún tipo de distribución estadística para el análisis de los datos, es decir, de acuerdo a la sección de la curva que se requiera analizar existen distribuciones que se acomodan mucho mejor que otras, de manera que representan de una mejor forma el comportamiento real de los datos.

Existen distribuciones que se caracterizan por analizar cualquier punto de la gráfica, como la distribución Weibull y la Hjorth, y otras que se acoplan a partes específicas de esta, según varios autores (Mora, 2009).

En el momento en el que se procede a estimar los parámetros de los datos se eligen una o dos distribuciones en función de las necesidades del estudio.

La decisión de utilizar una u otra se basa en el cumplimiento de algunos índices que enmarca la serie de datos que se analizan como válidos o no válidos, la calidad de la selección depende de las pruebas de bondad de ajuste, las cuales marcan la diferencia entre la realidad y los valores que se obtienen de la distribución para los diferentes tiempos, la cual califica el grado de acierto en la simulación con la distribución que se elige previamente.

Muchas distribuciones son útiles y simulan adecuadamente la confiabilidad, mantenibilidad y la disponibilidad, para condiciones particulares y específicas; entre las principales están: Normal, Exponencial, Gamma, Weibull, Log Normal, Binomial, Poisson, Erlang, Raleigh, *Ji Chi Cuadrada* y de valores extremos.

Los métodos para realizar la estimación de los parámetros de una distribución pueden ser simples o complejos, entre los simples destacan el gráfico y el de mínimos cuadrados, entre los complejos se encuentra el Método de Máxima Verosimilitud.

### 1.3.3 Distribuciones para la tercera fase de la curva de Davies o de la bañera

La forma que describe la tasa de fallas a través del tiempo en la vida útil de cualquier elemento o sistema, varía de acuerdo a la fase de la curva en que se encuentre este en el momento del estudio.

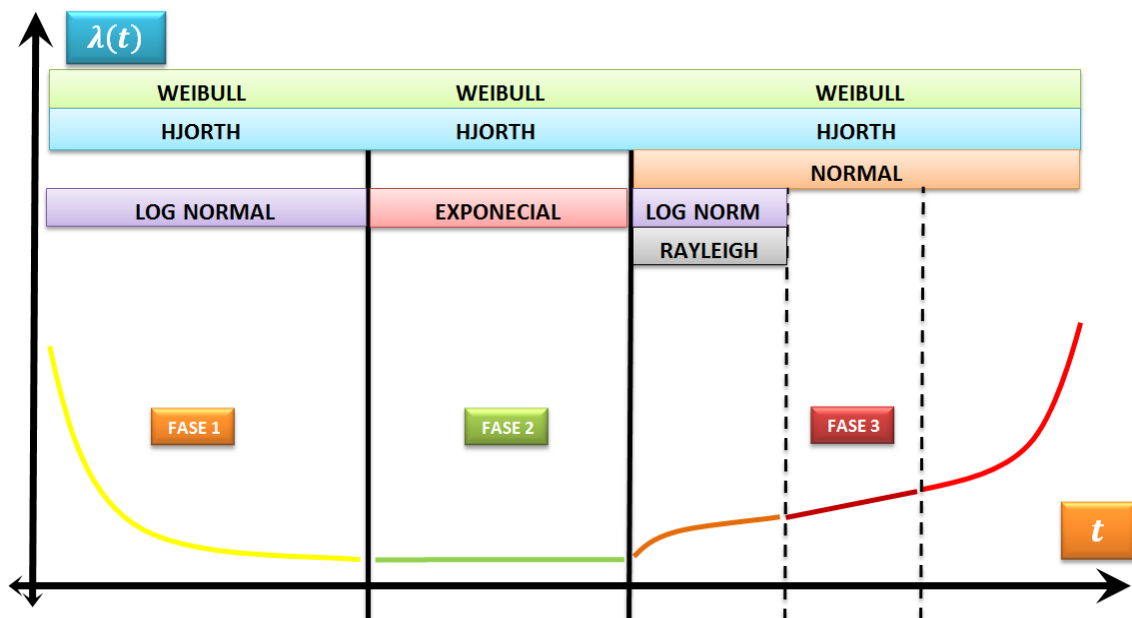
Como se menciona anteriormente la tasa de fallas se comporta de alguna manera en particular de acuerdo al tiempo de uso o trabajo al que se somete la maquina o sistema, por ende si la tasa de fallas respecto al tiempo toma formas específicas como decreciente, aleatoria, creciente y variaciones de estas, hace que el estudio de las diferentes fases del vida útil tengan comportamientos independientes y que la forma de análisis de datos no puede simularse o describirse por cualquier distribución que se desee.

Algunos autores que estudian las diferentes distribuciones estadísticas y sus respectivas funciones de probabilidad, logran definir cuáles de estas son propicias

para partes específicas, como también encuentran algunas que podrían ajustarse de una manera precisa a cualquier punto de la curva de vida útil, sin embargo siempre recomiendan utilizar dos o tres distribuciones, y comprobar a partir de los parámetros de bondad de ajuste, cuál de todas simula de mejor manera los datos del sistema a estudiar (Ebeling, 2005).

A continuación se muestra una gráfica donde se ilustra la ubicación de las diferentes distribuciones que comúnmente son utilizadas para el análisis de datos de indicadores CMD y en que fases de la curva de Davies se acoplan mejor para tener una idea de que posibilidades se tienen al momento de estudiar alguna fase determinada de la vida útil (Mora 2009).

Ilustración 2 - Banda de aplicación de distribuciones a la curva de la bañera



La gráfica anterior muestra la aplicabilidad de diferentes distribuciones utilizadas para el análisis de la curva de Davies, se aprecia que la distribución Weibull y Hjorth extienden su banda de aplicabilidad desde el inicio hasta el final de la curva, lo que indica que son propicias para el análisis en cualquier punto, también se aprecia que las restantes se acoplan a algunas fases en específico por el comportamiento específico de la tasa de fallas (Mora, 2009).

El objeto de estudio del proyecto se centra en la fase tres de la curva de Davies, la cual es llamada fase de desgaste o envejecimiento, esta fase se caracteriza por un incremento progresivo de la tasa de fallas en la medida que transcurre el tiempo.

La fase III en si misma se subdivide en tres etapas, la primera se caracteriza por el incremento sutil de la tasa de fallas, este aumento no es cuantioso y comienza a crecer de forma moderada, son causadas por el uso o desuso a través del tiempo.



La segunda etapa de la tercera fase, se identifica porque la tasa de fallas comienza presentar un crecimiento constante en el tiempo, con una pendiente constante y de trazo de forma rectilínea.

Por ultimo llega la etapa número tres, en la cual se acelera la vida útil de la maquina o elemento, la tasa de fallas aumenta apresuradamente, y se está próximo al final de la vida útil de la maquina o sistema, en este punto cuando ya las acciones de mantenimiento no mejoran la mantenibilidad o confiabilidad, las posibilidades que surgen son reposición y sustitución como única alternativa (Mora, 2012).

Según la gráfica de bandas de aplicabilidad de las distribuciones estadísticas, a la tercera fase la satisfacen varias distribuciones estadísticas, esto se debe a que contiene varias etapas de comportamiento (Distribuciones: Weibull, Hjorth, Log Normal, Normal, Raleigh, Erlang, Gamma), pero dado que algunas solo cubren una de las etapas de esta fase, se excluyen del conjunto de distribuciones para la selección (Log Normal y Raleigh).

La distribución Normal abarca toda la fase tres, la cual por teoría de elementos no reparables corresponde a su ubicación dentro de la curva, por tal motivo, se selecciona como óptima para el análisis de este tipo de datos.

Es preciso conocer los fundamentos de las distribuciones que se utilizan para el análisis, y entender como estos modelos estadísticos realizan la estimación de los parámetros y obtienen los resultados posteriores para el análisis.

El procesamiento de los datos y los cálculos que obedecen a cada una de las diferentes distribuciones se realizan por medio de software, el cual contiene los algoritmos con las fórmulas de cálculo de cada una, por lo que solo se debe ingresar la serie o la base de datos al sistema.

#### 1.3.4 Fundamentación técnica de las distribuciones que gobiernan los ciclos de vida útil, confiabilidad y fallas de elementos no reparables.

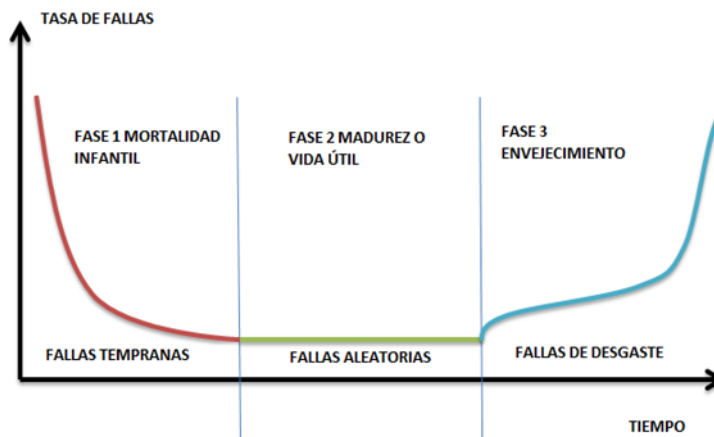
Los datos que se analizan mediante las distribuciones, pueden responder a diferentes características, de acuerdo con el tipo y evento de estudio, como por ejemplo el tiempo de funcionamiento del componente. Estos tiempos de vida pueden medirse en horas, millas, ciclos de fracaso, ciclos de tensión, ciclos de trabajo, o cualquier otra medida con que la vida o exposición del ítem pueda cuantificarse y evaluarse (O'Connor, 2002).

Los elementos no reparables según teoría fallan por envejecimiento, es decir, que llegan al final de su vida útil, porque sus partes y materiales se encuentran en condiciones de excesivo desgaste por tiempo y uso, lo que los hace cada vez más susceptibles a la falla.

El componente en cuestión al presentar este comportamiento, se ubica en la sección

final de la famosa curva de la bañera o de Davies, donde ya se cumple el tiempo de madurez o vida útil, y entra en la fase donde la tasa de fallos se incrementa considerablemente hasta tomar forma exponencial.

Ilustración 3 - Curva de la Bañera o Davies



En el caso particular del objeto de estudio del proyecto, aparte de la cantidad de horas de trabajo, también se analiza la cantidad de ciclos de encendido hasta el fallo de las bombillas, ya que estudios, experimentaciones y la misma vida cotidiana, demuestra que los bombillos de filamento fallan en el accionar, mas no por su

permanecía en estado de funcionamiento; una gran evidencia de este fenómeno, es la bombilla que se encuentra el parque de la Estación de Bomberos # 6 - 4550 East Ave, Livermore, California (Bunn Graphics), la cual se encuentra en funcionamiento desde el año 1901, lo que supone que en el año 2012 su vida útil llega a las 972000 horas de funcionamiento, información que es deslumbrante.

La recopilación del total de los datos de fallas de las bombillas, constituye la información a estudiar y analizar, mediante las distribuciones estadísticas. El punto de partida es seleccionar cuales de estas se acoplan de manera más adecuada a los datos disponibles y el modelo de distribución a utilizar; y luego se procede con la estimación de los parámetros de las diferentes distribuciones.

Como se expresa anteriormente la distribución Weibull modela toda la curva de la bañera, por lo que muchos autores utilizan esta distribución como punto de inicio para el análisis, y luego basándose en el valor de los parámetros de esta se define una segunda que se caracteriza por modelar una sección específica de la curva de manera apropiada. Se eligen la distribución Weibull como distribución inicial y normal como segunda para el análisis. A continuación se exponen los fundamentos de estas distribuciones.

### 1.3.5 Fundamentos de la distribución Weibull

La distribución Weibull es famosa por su gran cantidad de aplicaciones, las cuales van desde análisis de supervivencia, análisis de confiabilidad, modelación de procesos estocásticos, hasta meteorología. Esta gran versatilidad y número de aplicaciones, las obtiene gracias a que en su forma general tiene tres parámetros, lo que le da una gran flexibilidad, y cuya selección y ajuste adecuado permite obtener mejores contrastes, que con otras distribuciones.

Una de las ventajas significativas que posee la distribución Weibull es que se acomoda a las tres zonas (infancia o rodaje, madurez o vida útil y envejecimiento) de la curva de la bañera o de Davies.

#### 1.3.5.1 Parámetros de la distribución Weibull

Los parámetros que definen la distribución Weibull y que hace que esta pueda acoplarse a cualquier punto de la curva de la bañera son los siguientes:

- **Parámetro de forma ( $\beta$ ), *Beta*:** Establece la forma que toma la distribución y muestra la dispersión que poseen los datos. Este parámetro es el que define la forma de la tasa de fallos, es decir, cuando  $\beta < 1$  se determina una tasa de fallas decreciente ubicándose en la fase de mortalidad infantil, cuando  $\beta$  está en el rango cercano a 1 ( $0.95 < \beta < 1.05$ ) se determina una tasa de fallos aleatoria y constante, que define la fase dos de la curva la cual se conoce como madurez, luego de que  $\beta$  toma valores mayores que el rango cercano de 1 ( $\beta > 1.05$ ), se define una tasa de fallos creciente por lo que se ubica en la fase número tres de envejecimiento o desgaste.
- **Parámetro de escala o característica de vida útil ( $\eta$ ), *Eta*:** Parámetro que determina la vida útil del sistema o máquina, o la carga de trabajo predilecta para el mismo. Obtener un  $\eta$  alto quiere decir que el sistema o maquina puede obedecer a trabajos más largos.
- **Parámetro de posición ( $\gamma$ ), *gamma*:** Parámetro que indica espacio en el cual la probabilidad de fallas es nula, sin embargo por la dificultad en la estimación de este parámetro, en gran cantidad de ocasiones se asume como nulo o cero (Mora, 2012).

Los parámetros Beta y Eta ( $\beta$  y  $\eta$ ) se logra por medio de la alineación de la distribución de Weibull mediante las transformaciones necesarias, luego de la obtención de la pendiente y el intercepto de la recta se calculan los parámetros  $\beta$  y  $\eta$  de la distribución.

La interpretación de los parámetros de Weibull entrega gran cantidad de conclusiones acerca del comportamiento del componente en estudio, la tabla 1 ilustra cómo se interpreta la tasa de fallas de acuerdo al valor que tome el parámetro  $\beta$ , sin embargo esto también se evidencia al momento de graficar la tasa de fallas (Leemis, 1995).

Tabla 1 - Interpretación Parámetro de forma  $\beta$  de Weibull

<b>Valor de <math>\beta</math></b>	<b>Comportamiento</b>
<b><math>0 &lt; \beta &lt; 1</math></b>	Tasa de fallas Decreciente
<b><math>1 &lt; \beta &lt; 2</math></b>	Tasa de fallas creciente cóncava
<b><math>\beta &gt; 2</math></b>	Tasa de fallas creciente convexa

#### 1.3.5.2 Funciones continuas en Weibull

Las funciones más relevantes asociadas a los modelos de distribución para la modelación de los datos de los bombillos se definen a continuación, las cuales se presentan con sus bases teóricas en la distribución Weibull (Ebeling, 2005).

##### 1.3.5.2.1 Función de densidad de probabilidad

Esta función representa la probabilidad relativa de que la variable aleatoria tome valores con respecto a un valor específico de tiempo, ciclos de trabajo o etc. En términos de la investigación puede establecer con que probabilidad el bombillo podría fallar a los cien mil ciclos de encendido, a los doscientos mil o al número que se defina en la función.

Ecuación 4 - Función de densidad de probabilidad

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} * \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} * e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}}$$

Dónde:

$\beta = \text{beta}$

$\eta = \text{eta}$

$t = \text{ciclos, horas, etcétera.}$

##### 1.3.5.2.2 Función de confiabilidad o supervivencia

La función de confiabilidad determina la probabilidad de que una variable aleatoria tome valor al menos tan bajo como un valor específico  $t$ . Es decir, en términos de la investigación, expresa la probabilidad de que un bombillo no falle durante los primeros cien mil ciclos de encendido.

Ecuación 5 - Función de confiabilidad o supervivencia

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}}$$

##### 1.3.5.2.3 Función acumulativa de Fallas o de distribución

La función acumulativa de fallas determina la probabilidad de que una variable aleatoria tome valor menor que un valor determinado  $t$ . Es decir, en términos de la investigación, expresa la probabilidad de que un bombillo falle durante los primeros cien mil ciclos de encendido. Esta función es la complementaria de la función de confiabilidad (O'Connor, 2002).

Ecuación 6 - Función acumulativa de Fallas o de distribución

$$F(t) = 1 - R(t)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

$$F(t) + R(t) = 1$$

#### 1.3.5.2.4 Función de tasa de fallas o Riesgo

La función de tasa de fallas expresa la probabilidad de que el fallo o evento ocurra en el instante siguiente, con la condición de que no ha sucedido antes. En el contexto de la investigación si el bombillo no falla luego de los cien mil ciclos de encendido, con esta función se conoce la probabilidad de que falle a continuación en el siguiente.

Ecuación 7 - Función de tasa de fallas o Riesgo

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} * \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$$

#### 1.3.5.3 Parámetros de vida útil o Tiempo Medio entre Fallas en Weibull

En la distribución Weibull los parámetros de vida útil o Tiempo Medio entre Fallas *MTBF* se puede estimar a partir de:

Ecuación 8 - *MTBF* Weibull

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t)dt = \int (1 - F(t)) * dt$$

Dónde:

$R(t)$  = Función de confiabilidad

$F(t)$  = Función de no confiabilidad

(Galván, 2013)

#### 1.3.6 Fundamentos de la distribución Normal

Es una de las distribuciones más populares y útiles en la modelación de variables aleatorias, también se conoce como Gaussiana. Esta distribución difiere de otras en que su aplicación abarca el dominio real, por lo que puede tomar valores negativos, lo que le da la facultad de poder representar variables aleatorias como la temperatura y la posición.

Es comúnmente aplicada en la ingeniería de confiabilidad porque se acomoda muy bien y describe los modos de fallo debido al desgaste de los componentes, ya que

estos tienden a distribuirse en torno a un tiempo medio; también se relaciona en el modelado de procesos de reparación y mantenimiento, es decir en procesos de recuperación de la funcionalidad (O'Connor, 2002).

La distribución normal responde a dos parámetros:

- Media  $\mu$ : define donde se encuentra el centro de la distribución y por ende el eje de simetría.
- Desviación estándar  $\sigma$ : este parámetro describe el grado de dispersión de los datos con respecto la media.

Cabe anotar que cuando se realizan estudios de confiabilidad y mantenimiento mediante esta distribución, se pueden prestar incongruencias, ya que por el dominio de este modelo, se pueden presentar valores negativos, los cuales no son propios o acordes con este tipo de estudios, sin embargo, cuando el cero se encuentra a por lo menos cuatro veces la desviación estándar del centro de la distribución, la probabilidad de que tome valores inferiores a este son muy pequeñas y los defectos de la distribución despreciables (Galván, 2013).

Para omitir dichos posibles errores desde un principio para el análisis de la vida útil de algún componente, varios autores proponen que la distribución debe modificarse levemente, ya que el periodo de funcionamiento o ciclo de vida no puede tener valores negativos, para esto se modifica el recorrido de la variable  $t$ , limitándola solo al intervalo  $(0, +\infty)$ , esta modificación implica la utilización de un factor de normalización que se encuentra en la distribución normal truncada (Mora 2009).

#### 1.3.6.1 Funciones continuas en Normal

Para el modelo normal igualmente se describen las ecuaciones que describen las funciones más relevantes asociadas a este; a continuación se presentan las bases teóricas de estas para esta distribución.

##### 1.3.6.1.1 Función de densidad de probabilidad

La función de densidad en normal se obtiene mediante los parámetros media y distribución estándar en el suceso específico  $t$ .

Ecuación 9 - Función de densidad de probabilidad

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

##### 1.3.6.1.2 Funciones de confiabilidad, acumulativa de fallas y tasa de fallas

Para estas funciones se deben solucionar integrales, como se muestra a continuación.

Ecuación 10 - Funciones de confiabilidad en D.normal

$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{1}{2}*\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt$$

Ecuación 11 - Funcion acumulativa de fallas en D.normal

$$F(t) = \int_0^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{1}{2}*\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt$$

Ecuación 12 - Funcion tasa de fallas en Distribución Normal

$$\lambda(t) = \frac{e^{-\frac{1}{2}*\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}}{\int_t^{\infty} e^{-\frac{1}{2}*\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

(Galván, 2013)

#### 1.3.6.2 *Parámetros de vida útil o Tiempo Medio entre Fallas en Normal*

En la distribución Normal los parámetros de vida útil o Tiempo Medio entre Fallas *MTBF* se puede estimar a partir de:

Ecuación 13 - *MTBF* Normal.

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t)dt = \int (1 - F(t)) * dt$$

Dónde:

$R(t)$  = *Función de confiabilidad*

$F(t)$  = *Función de no confiabilidad*

(O'Connor, 2002)

## 1.4 CONCLUSIONES DE CAPITULO

La sección inicial deja las bases técnicas suficientes, de manera explícita, para que el lector o usuario del proyecto, pueda manejar con soltura los desarrollos de los siguientes objetivos y/o capítulos, en los cuales las funciones de densidad, de tasa, de probabilidades de fallas, como los tipos de alineación o no y demás parámetros como bondades de ajuste, etcétera, son los elementos de juicio, para la interpretación y el análisis de los diferentes logros experimentales y estudios estadísticos de distribuciones, con softwares, de las bombillas de frenado automotriz, en los cuales se lanza la hipótesis de que sobreviven hasta la zona de fatiga, desgaste o envejecimiento en la Curva de Davies.

## 2 RECONOCIMIENTO

### 2.1 OBJETIVO DE CAPITULO 2

Describir las características de vida útil del comportamiento de los elementos que se ubican en la fase III de la curva de Davies.

### 2.2 INTRODUCCION A CAPITULO 2

La sección introduce al usuario o lector, en los fundamentos y características de funcionamiento de los bombillos, mediante la descripción de parámetros técnicos, físicos, electromagnéticos, lumínicos, de calentamiento, de vida útil, eléctricos y de iluminación, en su comportamiento habitual ante la acción de frenado automotriz.

### 2.3 DESARROLLO

El capítulo se secciona en varias etapas, acorde al punto en especial a tratar, así:

### 2.4 TERMINOLOGÍA Y FUNDAMENTACIÓN PARA LOS ELEMENTOS NO REPARABLES

El contexto de la investigación se desarrolla alrededor de un tipo de elemento en especial, los no reparables, los cuales abarcan un grupo bastante amplio, sin embargo, si se pone como ejemplo una bombilla, la cual es útil tanto al ciudadano particular, como a la industria, mientras que esta alumbró (cumple su función), ya que todos ven luz, y que disponen de ella; La confiabilidad de esta es la probabilidad que la bombilla esté en buen estado y funcione durante un intervalo de tiempo  $t$  específico; completo el tiempo de funcionamiento, la bombilla no puede ser restaurada a su estado de funcionamiento, por lo que al primer fallo cumple su vida útil.

#### 2.4.1 Confiabilidad

La confiabilidad es la probabilidad de que un equipo, componente o sistema cumpla con la función para la que se requiere, en condiciones determinadas, durante un intervalo de tiempo  $[t_1, t_2]$ ; y se formula con función:  $R(t_1, t_2)$  (Ebeling, 2005).

La confiabilidad abarca algunas definiciones fundamentales para el entendimiento y comprensión de la misma, dichas definiciones se exponen a continuación.

##### 2.4.1.1 Funciones principales y secundarias:

Las funciones son aquellas acciones que deben desempeñar un equipo, componente o sistema para las cuales se diseña. En varias ocasiones se encuentran acompañadas de una o varias acciones secundarias. La confiabilidad es una propiedad de la función que se atribuye a un sistema. El conocimiento de su



arquitectura material debe complementarse con métodos de análisis funcional.

#### 2.4.1.2 Condiciones de trabajo

Todo equipo, componente o sistema, se diseña para trabajar bajo unas condiciones dadas, el papel del medio ambiente es primordial en la confiabilidad, ya que la modificación de las condiciones de diseño, influirá en la ejecución de la función principal y su desempeño.

#### 2.4.1.3 Intervalo

Para todo equipo, componente o sistema, se parte de la hipótesis de que funciona en su primer instante, según esto, lo que se busca encontrar es la duración de esta condición, dado también que se espera obtener una duración considerable. En general  $t_1 = 0$  y se formula la confiabilidad por  $R(t)$ .

#### 2.4.2 Disponibilidad

La disponibilidad es la probabilidad que un equipo, componente o sistema pueda cumplir su función, en las condiciones determinadas, en un instante que se le necesite, con la condición de que todas las variables de los medios externos necesarios cumplen su función de manera correcta. Se formula por la función  $D(t)$ . Esta definición difiere de la de confiabilidad por la diferencia fundamental en el aspecto temporal, una se refiere a un período de tiempo y la otra a un instante dado (CEI, 1988).

#### 2.4.3 Tasa de fallo $\lambda(t)$

Representa el número de fallos por unidad de tiempo. La tasa de fallo en el instante  $t$ , mide la probabilidad que ocurra un suceso imprevistamente en el intervalo  $[t, t+\Delta t]$ . Su inverso es el tiempo medio entre fallos.

#### 2.4.4 Magnitudes en función del tiempo medio

Además de las probabilidades de ocurrencia de los sucesos (confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad), también se analizan los tiempos medios entre los sucesos.

##### 2.4.4.1 MTTF o MTFF

(*Mean Time To First Failure*). Tiempo medio de funcionamiento hasta el fallo o hasta primer fallo.

##### 2.4.4.2 MTBF

(*Mean Time Between Failure*): Tiempo medio entre fallas (para sistemas reparables).

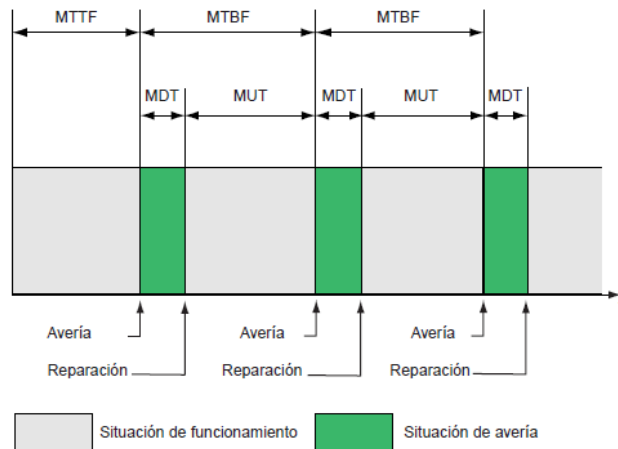
#### 2.4.4.3 MDT

(*Mean Down Time*): tiempo medio de estado de fallo, en este se incluye la detección de la avería, el tiempo de intervención, el tiempo de reparación y el tiempo de puesta en servicio.

#### 2.4.4.4 MTTR

(*Mean Time To Repair*) tiempo medio de reparación.

Ilustración 4 - Magnitudes en función del tiempo medio (Schneider Electric, 2000).



Para un sistema no reparable  $MTBF = MTTF$  (donde todas las averías son las primeras averías). Es este el caso de aplicación de la fórmula clásica, ampliamente utilizada, para los componentes electrónicos (no reparables):  $MTBF = 1/\lambda$ . Esta fórmula para leyes exponenciales, únicamente es aplicable, de manera estricta, para un componente no reparable (Díaz, 1992).

#### 2.4.5 Tipos de Fallas o defectos

Los hay de diversos tipos y formas, los de mayor incidencia e importancia se describen a continuación.

##### 2.4.5.1 Físicos (Averías)

Las averías se pueden inducir por causas internas (rotura de un elemento) o externas (interferencias electromagnéticas, vibraciones)

##### 2.4.5.2 Diseño

Que reagrupan principalmente los errores de concepción material y/o de fabricación.

##### 2.4.5.3 Utilización

Abarcan los defectos que se generan por una mala utilización:

- Material o componente que se emplea en un entorno para el cual no se diseña.

- Error humano en la utilización del material, o consecuencia de una incorrecta operación de mantenimiento.
- Sabotaje.

(Schneider Electric, 2000)

## 2.5 ELEMENTOS NO REPARABLES

Un elemento que no se puede devolver a su estado original por medio de una reparación, luego de pasar a un estado de falla, ni posible de mantener durante su vida útil previa al fallo, se denomina elemento no reparable.

Esta condición de no reparabilidad, se debe a que el elemento como componente de un sistema puede actuar como fusible y dentro de su función principal, está la de fallar en el momento oportuno, para proteger los sistemas de mayor importancia que por lo general son reparables, lo que induce a la necesidad de que el elemento falle; por otro lado se encuentran todos aquellos elementos, que son más fáciles de reponer por uno nuevo que repararlo, ya sea por su costo, por la poca vida útil o reincidencia en el fallo luego de la reparación, como es el caso de muchos componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos, entre los que se encuentran las bombillas.

Los elementos no reparables en la industria actual constituyen una parte fundamental en las diferentes maquinas, mecanismos, estructuras y demás sistemas de ingeniería que en su arreglo posean componentes que trabajan en conjunto.

Entre sus diferentes aplicaciones, los elementos no reparables desempeñan papeles estratégicos e importantes, tales como fusibles y sistemas de seguridad en todo tipo de maquinaria y montajes, por tal motivo es de un gran interés conocer su confiabilidad, comportamiento y duración bajo la interacción con las diferentes variables que inciden en su infancia, rodaje y envejecimiento (Leemis, 1995).

La teoría de los elementos no reparables, expresa que estos comúnmente llegan a un estado de falla a causa del envejecimiento del componente, con excepción de todos aquellos que cumplen la función de fusible, para todo el grupo restante, se le atribuye el tipo de falla por efectos del desgaste, fatiga y pérdida paulatina de su función a través de su vida útil. Este modo de falla, es propio de la tercera fase de la famosa curva de Davies, donde la probabilidad de falla se incrementa por la fatiga que sufre el componente durante su vida útil (Lewis, 1995).

Dentro de este amplio grupo de componentes se encuentran las bombillas instaladas en los *stops* (luces de freno) del común denominador de marcas de vehículos, con excepción de los vehículos de alta gama. Este es uno de los

elementos no reparables de gran consumo y utilización en la actualidad, por lo que es de gran interés la realización de un estudio que demuestre experimentalmente el comportamiento de estos componentes, y además poder emitir conclusiones sobre la teoría de fallas de estos.

A continuación se exponen las características, materiales y demás propiedades de los dos tipos de bombillas que se encuentran en el mercado con diferencias más significativas, por un lado se encuentra la bombilla de filamento incandescente, la cual es la más común, de mayor uso y producción por un gran número de industrias eléctricas reconocidas a nivel mundial y por ende la más instaladas en todos los vehículos por los concesionarios de todo tipo de marcas.

Por otro lado se encuentra una variación de la bombilla filamento fabricada con LED, la cual es un producto nuevo, diferente, de poca utilización y conocimiento, no se desarrolla por grandes empresas aún, y por ahora se ve como un repuesto de “lujo” para vehículo; encontrándose solo en pocos almacenes de suministros de vehículos. Por algunas de las razones antes mencionadas este tipo de bombillas evidencian falta de pulidez, acabados y materiales de no muy buena calidad, por lo que se intuye que los procesos de fabricación y manufactura de estos, no son hasta ahora muy buenos, por lo que la calidad del producto no es la mejor (Mora, 2012).

## 2.6 BOMBILLA DE FILAMENTO INCANDESCENTE

### 2.6.1 Historia y estado del arte

El término de lámpara incandescente comienza a popularizarse a principios del siglo XIX cuando varios inventores empezaron a desarrollar e investigar sobre la generación de luz a partir de la electricidad. En 1809 ante la Royal Society el inventor Humphry Davy mostró un experimento donde logró obtener luz con el uso de un hilo de platino. En el transcurrir del siglo XIX se desarrollan lámparas incandescentes las cuales varían en la manera de crear el vacío en el bulbo y en los materiales de los filamentos los cuales son principalmente cobre, platino, carbono y grafito. Estas lámparas incandescentes funcionan, pero únicamente en el laboratorio y por muy corto tiempo, hasta 1879, cuando Thomas Alva Edison desarrolla filamentos de materiales distintos que duran mayor tiempo, al principio sus bombillos tienen una vida útil de 13.5 horas con filamentos de fibra de carbono derivada del algodón; a medida que se mejoran los procesos y materiales en 1880 Edison logra desarrollar filamentos de fibra de carbono que se extraen del bambú, con el cual logra una vida útil de hasta 1200 horas.

La empresa *General Electric Company* en 1906 patenta un método para fabricar bombillos en serie con filamentos de tungsteno (el cual tiene su punto de fusión a 3442 [°C]), el mismo que aún se usa para la fabricación de los bombillos incandescentes (Antonelli, 1995).

En el año 2009 la Unión Europea desmonta gradualmente la producción de los bombillos incandescentes en los países que pertenecen a la UE por su gran consumo energético. En el 2009 se desmonta la producción de bombillos de 100 vatios y en el 2012 se para la fabricación de las últimas bombillas incandescentes en producción de 25 vatios.

La normativa de la UE también exige que se indique en el envoltorio la duración de la bombilla, según un cálculo que se basa en un encendido y apagado por hora de funcionamiento (CEI , 1988).

### 2.6.2 Funcionamiento y partes

Para conocer el principio de funcionamiento de las lámparas incandescentes es necesario aclarar dos principios físicos que dan lugar al funcionamiento; estos dos principios son la incandescencia y el efecto Joule.

El término incandescencia se refiere a la generación de luz a partir de un cuerpo caliente; cualquier cuerpo caliente emite radiación electromagnética en todo el espectro y parte de esa radiación es luz visible por el ojo humano. Este es el principio que usan los bombillos incandescentes para generar luz.

Con el objetivo de generar el calor necesario para emitir una cantidad considerable de luz se usa la energía eléctrica, es aquí donde entra a jugar el efecto Joule, el cual se basa en que al circular corriente eléctrica por un material conductor, este se calentará por la pérdida de energía de los electrones (General Electric, 1980).

Las partes y elementos que componen a una bombilla incandescente se describen a continuación.

#### 2.6.2.1 *Filamento*

El filamento es el elemento principal dentro de las bombillas incandescentes pues a través de él se hace circular la corriente eléctrica, y por el efecto Joule se calienta el filamento excesivamente; y a causa de este calentamiento el filamento emite radiación electromagnética, dentro de la cual hay luz visible al ser humano.

#### 2.6.2.2 *Gas inerte*

El filamento se encuentra a una temperatura muy elevada, y al entrar en contacto con el oxígeno, se produce combustión y se quema. Por lo tanto es necesario reemplazar el aire atmosférico (rico en oxígeno) alrededor del filamento por un gas que no reaccione a esas temperaturas.

#### 2.6.2.3 *Bulbo*

El bulbo es un envase o envoltorio de vidrio, el cual crea un aislamiento entre el gas inerte y la atmosfera, que impide que el gas inerte escape y que en algún momento

pueda entrar oxígeno a la cavidad.

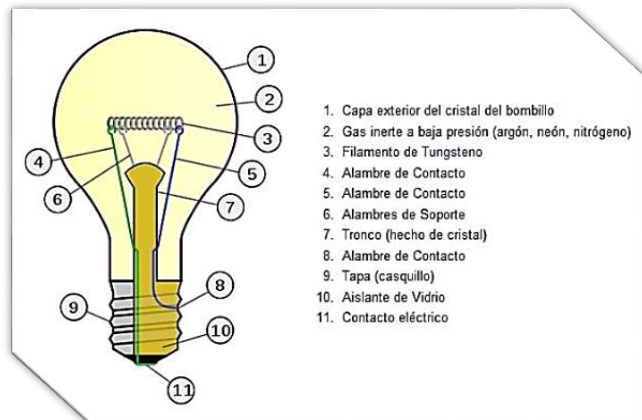
#### 2.6.2.4 Base

Para calentar el filamento es necesario hacer circular una corriente eléctrica a través de este, por eso es necesario que los extremos del filamento estén en contacto con una fuente de voltaje.

La función de la base es hacer que los extremos del filamento se conecten a las terminales de la fuente de voltaje sin que se unan entre ellas, es decir la base tiene el contacto para cada uno de los extremos del filamento. (General Electric, 1980)

En la siguiente ilustración se observan las partes del bombillo incandescente común.

Ilustración 5 - Partes Bombilla filamento



Los bombillos que se utilizan en la investigación son de luz de freno de vehículos, estos bombillos tienen dos filamentos, uno de alta y otro de baja intensidad.

En la siguiente ilustración se muestran las partes de estos bombillos en particular.

Ilustración 6 - Partes bombilla luz de freno vehículo



### 2.6.3 Materiales

Desde hace mucho tiempo los bombillos incandescentes se fabrican con los mismos materiales pues su funcionamiento es tan sencillo que no se requieren mejoras, excepto en los procesos de producción.

#### 2.6.3.1 Bulbo

El material del bulbo debe ser un material permita el paso de la luz, que resista el calor que se genera por el filamento y que aisle

totalmente la atmosfera del gas inerte que rodea al filamento. Desde los primeros ensayos y experimentos se usa vidrio como material para el bulbo, y actualmente continúa como material para fabricar estos.

#### 2.6.3.2 *Filamento*

Como se explica en secciones anteriores desde 1906 se emplea el tungsteno como material para los bombillos incandescentes, por sus propiedades físicas y térmicas. Desde entonces no se descubre material que supere dichas características.

#### 2.6.3.3 *Gas inerte*

Inicialmente para evitar el daño prematuro del filamento, se usa el vacío para aislar el oxígeno. Posteriormente se descubre que los gases inertes a bajas presiones ayudan a aumentar la vida útil de los filamentos, por lo que actualmente se usan gases como el argón o el Kriptón.

Las lámparas halógenas son una variación de las incandescentes pues su principio de funcionamiento es el mismo, únicamente se diferencian en que aparte del gas inerte, se tiene un gas halógeno (yodo o bromo) el cual le incrementa la vida útil al filamento, además en este tipo de lámparas el filamento alcanza una mayor temperatura y por lo tanto el bulbo ya no se fabrica en vidrio si no en cuarzo, pero el filamento permanece de tungsteno (General Electric, 1980).

#### 2.6.4 *Aplicaciones*

Actualmente las bombillas incandescentes tienden a desaparecer como fuentes de luz para recintos y en uso doméstico por su alta ineficiencia; se estima que de la energía que usa una bombilla incandescente, únicamente el 5% se transforma en luz, el 95% restante se transforma en calor y radiación fuera del espectro visible. Es por esto que los países de la Unión Europea en el 2009 optan por prohibir su producción y ordenan el desmonte gradual de la comercialización de bombillas incandescentes. Sin embargo, aún en muchos países del mundo se usan este tipo de bombillas para uso doméstico y en la mayoría aún no se instauran leyes claras acerca de la prohibición de este tipo de bombillos.

Los bombillos incandescentes se usan comúnmente aún en la iluminación de vehículos. En las luces delanteras comúnmente se utilizan lámparas halógenas por su gran potencia, y en las luces de freno se usan bombillos incandescentes comunes.

La iluminación con este tipo de bombillas se aprecia en vehículos de gama alta como baja, con excepción de algunos autos en particular y de las marcas muy lujosas, que actualmente utilizan iluminación led en sus diseños. Hay una gran posibilidad de que en un futuro próximo, esta tendencia se aplique a la totalidad de automotores.

### 2.6.5 Causas de falla

La causa principal de la falla de un bombillo incandescente es la ruptura del filamento, lo que rompe el circuito y la circulación de electricidad, por lo que no se puede generar luz. Las principales causas por las que el filamento puede llegar a fallar o por las cuales se puede reducir significativamente la vida útil se explican a continuación:

#### 2.6.5.1 *Vibraciones*

Si el bombillo, se somete a constantes y fuertes vibraciones, el filamento por ser tan delgado puede llegar a sufrir una ruptura por la fatiga mecánica a la que es sometido. Esta es una causa muy común de falla de los bombillos.

Uno de los lugares clásicos donde se dan fuertes vibraciones y se ubican bombillos cerca, son los que se instalan en los ventiladores de techo, cuando los ventiladores están desbalanceados se genera una vibración muy fuerte la cual se transmite al filamento del bombillo debilitándolo considerablemente. Otro ejemplo son los bombillos que se usan en automóviles los cuales de acuerdo a las vías por las que se transite, se someten igualmente a fuertes vibraciones.

#### 2.6.5.2 *Voltaje excesivo*

Si el soporte de conexión del bombillo (plafón o socket) tiene un voltaje de entrada mayor al voltaje de diseño del bombillo, genera sobrecalentamiento en el filamento y por ende reducción de la vida útil del mismo.

#### 2.6.5.3 *Soporte de conexión incorrecto*

Los soportes de conexión de los bombillos se fabrican para una potencia máxima, si un soporte de cierta potencia se le instala un bombillo de una potencia mayor, este se calentará en exceso, transfiriendo calor a sus demás partes, entre ellas el filamento, lo que induce al mismo desgaste que se obtiene por alto voltaje.

#### 2.6.5.4 *Intermitencia*

Cuando se enciende un bombillo hay un pico de corriente inicial mayor a la corriente nominal, por lo tanto si se enciende y se apaga constantemente un bombillo, a través de su filamento va a circular también ese pico de corriente. El paso de una corriente mayor a la corriente de diseño ocasiona un desgaste prematuro en el filamento, que acorta su vida útil.

Las intermitencias pueden estar ocasionadas por malas conexiones o por plafones defectuosos que constantemente conectan y desconectan el paso de corriente.



## 2.7 BOMBILLA DE LED

Los aspectos más relevantes de esta clase de focos de frenado, se describen en los siguientes párrafos.

### 2.7.1 Historia y estado del arte

LED es la sigla en inglés para diodo emisor de luz (LED - *Ligthing Emiting Diode*), su principio de funcionamiento se basa en el “inverso” del efecto fotoeléctrico, es decir, que su principio se basa en que un material genera luz cuando se somete a una corriente eléctrica.

En el año 1907, el físico inglés Henry Round descubre que los materiales inorgánicos puede iluminarse si se les aplica una corriente eléctrica, sin embargo su investigación no está orientada hacia esto, así que no se le da mucha importancia.

Luego en 1935, Georges Destrau descubre la emisión de luz en el sulfuro de zinc, hoy en día se considera como el padre de la electroluminiscencia. En 1951 el desarrollo de los transistores facilita el entendimiento de la electroluminiscencia y potencia el desarrollo de los LED (Gago Calderón, y otros, 2012).

En el año 1962, se fabrica el primer LED por el norteamericano Nick Holonyak, donde usa como material, la combinación de galio, arsénico y fosforo (GaAsP), el cual es de color rojo. Desde la década de los 60 se desarrollan distintos materiales semiconductores, que aumentan la eficiencia de los LED y la producción de luces de nuevos colores (verde, amarillo, naranja); pero no fue sino hasta 1993 que el japonés Shuji Nakamura logra desarrollar el LED de color azul el cual es difícil de conseguir.

Posteriormente se desarrolla y mejora más la eficiencia de los LED, hasta los 150 [lumen/Watt]. Hasta la década de los 90 los LED se usan en dispositivos eléctricos y electrónicos como indicadores, o en pequeñas pantallas monocromáticas; actualmente por el al gran desarrollo de la reproducción de colores y su alta eficiencia se usan en luces de automóviles y hasta televisores de alta definición (Gago Calderón, y otros, 2012).

### 2.7.2 Funcionamiento y partes

Un diodo es un dispositivo electrónico que únicamente permite el paso de corriente en un solo sentido, el principio de funcionamiento se basa tiene dos regiones de materiales semiconductores distintos; la región del semiconductor N es un material que posee una carga negativa, y la región del semiconductor P que posee una carga positiva.

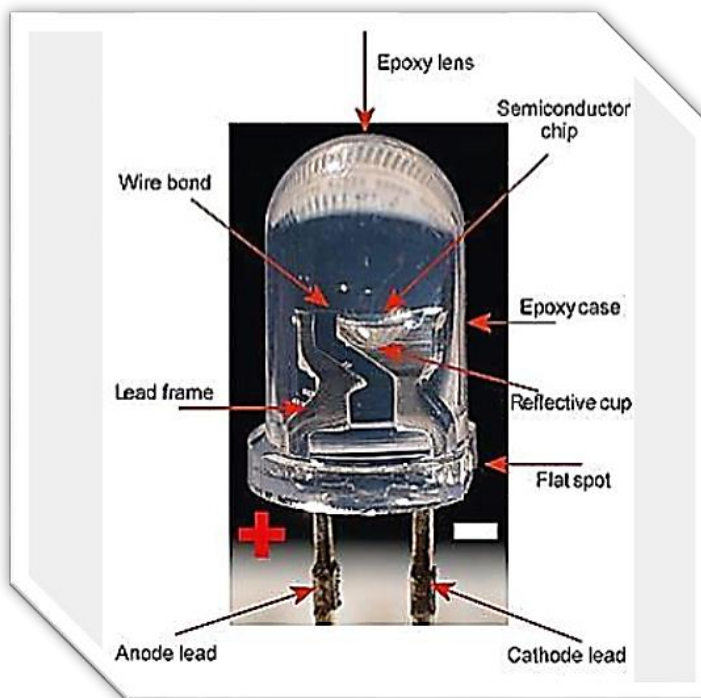
Cuando se somete el diodo a una tensión positiva en su lado P y a una negativa en su lado N, este permite el flujo de corriente, y si se hace al contrario el diodo no permite el paso de corriente.

Un led para emitir luz se aprovecha de la pérdida de energía de los electrones al pasar de la región N a la región P. Un electrón debe pasar de la región con abundancia de electrones a la región con déficit de electrones, este paso también se conoce como *recombinación* y para poder hacer este, el diodo se somete a una corriente eléctrica la cual obliga a los electrones a pasar de la zona de carga negativa hasta la zona de carga positiva, al hacer esto los electrones pierden energía por lo que emiten un fotón.

El color de la luz que emite depende de la longitud de onda y esta a su vez depende de que tanta energía pierda el electrón. La cantidad de energía que pierde el electrón al pasar la frontera está dada por los materiales y por las características de los semiconductores, es por esto que los LED de cada color usan todos diferentes materiales semiconductores (Gago Calderón, y otros, 2012).

A continuación se enumeran y explican las principales partes que componen un LED convencional.

Ilustración 7 - Partes LED



#### 2.7.2.1 Ánodo

El ánodo es la terminal donde se conecta la terminal positiva de la batería, pues al ser un diodo la corriente solo circula en un sentido, por lo tanto la fuente se debe conectar únicamente.

#### 2.7.2.2 Cátodo

El cátodo es la terminal donde se conecta la terminal negativa de la fuente de poder.

#### 2.7.2.3 Chip semiconductor

El chip semiconductor es el elemento donde se genera el fotón, está compuesto por una región cargada negativamente

y una cargada positivamente, cuando un electrón pasa de la región N a la región P del chip se produce el fotón.

#### 2.7.2.4 Reflector

Debajo del chip semiconductor los LED poseen reflectores para direccionar la luz

que se emite en el chip.

#### 2.7.2.5 *Lente y protector*

Los led convencionales poseen un lente y un protector que se fabrica con epoxi tanto para proteger el LED como para enfocar la luz.

### 2.7.3 Tipos de led

Existe una gran variedad de LED en la actualidad, entre los más comunes, sobresalen:

#### 2.7.3.1 *Encapsulado*

Este tipo de LED es el más común, posee un encapsulado de epoxi, este tipo de led no es de alta eficiencia y se usa en componentes eléctricos y electrónicos como indicador. Su fabricación es bastante económica. Este tipo de led también se usa para emitir señales infrarrojas que se usan en los controles remotos de electrodomésticos.

#### 2.7.3.2 *SMD*

Los LED SMD (dispositivo para montaje superficial) son diodos que se fabrican especialmente para instalarse sobre circuitos impresos. Estos led son mucho más pequeños que los led convencionales y son más eficientes.

Se usan como indicadores en tarjetas electrónicas, para enviar señales infrarrojas y además también se fabrican pequeños circuitos impresos para hacer bombillas de iluminación vehicular. Este tipo de LED es el que está presente en los bombillos que se usan en la investigación.

#### 2.7.3.3 *OLED*

Los OLED son igualmente diodos emisores de luz, pero el chip semiconductor está compuesto por un material orgánico, en vez de semiconductores inorgánicos como el arseniuro de galio o el nitruro de galio que se usan en los otros tipos de LED. Igualmente este tipo de led usa diferentes materiales inorgánicos para generar diferentes colores.

### 2.7.4 Materiales

En cuanto a materiales solo se especifica cuáles son los materiales que conforman el chip semiconductor. De acuerdo al material que se usa en el semiconductor, el diodo emitirá un color en específico. A continuación se muestra una tabla con los materiales del semiconductor y su color correspondiente.

Ilustración 8 - Materiales del semiconductor y su color

	Wavelength (nm)	Color Name	Fwd Voltage (Vf @ 20ma)	Intensity 5mm LEDs	Viewing Angle	LED Dye Material
	940	Infrared	1.5	18mW @50mA	15°	GaAlAs/GaAs - Gallium Aluminum Arsenide/Gallium Arsenide
	880	Infrared	1.7	18mW @50mA	15°	GaAlAs/GaAs - Gallium Aluminum Arsenide/Gallium Arsenide
	850	Infrared	1.7	26mW @50mA	15°	GaAlAs/GaAs - Gallium Aluminum Arsenide/Gallium Aluminum Arsenide
	660	Ultra Red	1.8	2000mc d @50mA	15°	GaAlAs/GaAs - Gallium Aluminum Arsenide/Gallium Aluminum Arsenide
	635	High Eff. Red	2	200mc d @20mA	15°	GaAsP/GaP - Gallium Arsenic Phosphide / Gallium Phosphide
	633	SuperRed	2.2	3500mc d @20mA	15°	InGaAlP - Indium Gallium Aluminum Phosphide
	620	SuperOrange	2.2	4500mc d @20mA	15°	InGaAlP - Indium Gallium Aluminum Phosphide
	612	Super Orange	2.2	6500mc d @20mA	15°	InGaAlP - Indium Gallium Aluminum Phosphide
	605	Orange	2.1	160mc d @20mA	15°	GaAsP/GaP - Gallium Arsenic Phosphide / Gallium Phosphide
	595	SuperYellow	2.2	5500mc d @20mA	15°	InGaAlP - Indium Gallium Aluminum Phosphide
	592	SuperPure Yellow	2.1	7000mc d @20mA	15°	InGaAlP - Indium Gallium Aluminum Phosphide
	585	Yellow	2.1	100mc d @20mA	15°	GaAsP/GaP - Gallium Arsenic Phosphide / Gallium Phosphide
	4500K	"Incan- descent" White	3.6	2000mc d @20mA	20°	SiC/GaN - Silicon Carbide/Gallium Nitride
	6500K	Pale White	3.6	4000mc d @20mA	20°	SiC/GaN - Silicon Carbide/Gallium Nitride
	8000K	Cool White	3.6	6000mc d @20mA	20°	SiC/GaN - Silicon Carbide/ Gallium Nitride
	574	Super Lime Yellow	2.4	1000mc d @20mA	15°	InGaAlP - Indium Gallium Aluminum Phosphide
	570	Super Lime Green	2	1000mc d @20mA	15°	InGaAlP - Indium Gallium Aluminum Phosphide
	565	High Efficiency Green	2.1	200mc d @20mA	15°	GaP/GaP - Gallium Phosphide/Galliu m Phosphide
	560	Super Pure Green	2.1	350mc d @20mA	15°	InGaAlP - Indium Gallium Aluminum Phosphide
	555	Pure Green	2.1	80mc d @20mA	15°	GaP/GaP - Gallium Phosphide/ Gallium Phosphide
	525	Aqua Green	3.5	10,000mc d @20mA	15°	SiC/GaN - Silicon Carbide/ Gallium Nitride
	505	Blue Green	3.5	2000mc d @20mA	45°	SiC/GaN - Silicon Carbide/ Gallium Nitride
	470	Super Blue	3.6	3000mc d @20mA	15°	SiC/GaN - Silicon Carbide/ Gallium Nitride
	430	Ultra Blue	3.8	100mc d @20mA	15°	SiC/GaN - Silicon Carbide/ Gallium Nitride

### 2.7.5 Aplicaciones

Anteriormente los LED se usan únicamente en dispositivos eléctricos y electrónicos con la función de indicadores, o en su defecto para emitir y recibir señales infrarrojas. Actualmente por el desarrollo tecnológico, los LED se usan cada vez más en otras áreas como la iluminación y el video.

Los LED se usan actualmente en lámparas y bombillas, pues por su gran eficacia y larga vida útil, se convierten en el reemplazo de los bombillos comunes como reflectores incandescentes, fluorescentes y halógenos.

Ilustración 9 - Aplicaciones LED



**Reflector LED 100 W    Bombillos LED luz de freno    Bombillo LED domestico**

Los LED también se usan para fabricar pantallas, estas pueden ser monocromáticas, que sirven para mostrar caracteres, o también pueden ser grandes pantallas de video policromaticas, que recrean pixeles con LEDs verdes, rojos y azules, estas últimas son pantallas gigantes que se usan en grandes escenarios como los estadios.

Ilustración 10 - Pantalla LED monocromática - Pantalla gigante LED



Su alta eficiencia energética y su larga vida útil, los hace propensos para para iluminar televisores, que anteriormente se iluminan con tubos fluorescentes, de poca eficiencia energética y vida útil mucho más corta.

#### 2.7.6 Causas de falla

A diferencia de los bombillos incandescentes, las partes que componen los LED no están sujetas a fallos totales, es decir, que es poco probable que alguna de sus

partes se averíe y el LED deje de funcionar totalmente. Entonces las fallas que ocurren con los LED generan una disminución en la intensidad de la luz que emite. A continuación se describen algunos problemas que pueden ser los causantes de esta disminución de luz.

#### *2.7.6.1 Fallas en el chip*

Durante la operación normal, el desempeño óptico de los LED disminuye gradualmente con el paso del tiempo. Esta disminución en el desempeño se causa por defectos crecientes en las capas superficiales del chip lo cual resulta en un incremento de recombinaciones no radiactivas, es decir, que se consume energía eléctrica, pero no se genera luz lo cual afecta directamente la eficiencia óptica.

Este tipo de defectos se producen por inducir corrientes mayores a la corriente que soporta el chip y al sobrecalentamiento del mismo. Estos defectos se pueden mitigar con materiales semiconductores de mejor calidad y mejor disipación de calor en el chip.

#### *2.7.6.2 Construcción interna del LED*

Una posible causa de la reducción de la emisión de luz es el aumento en la resistencia eléctrica del diodo, lo cual puede tanto disminuir la emisión de luz como ocasionar la falla total del LED. Se encuentra que el proceso de producción de los LED puede ser muy incidente, pues la mala disipación del calor, soldaduras defectuosas que producen agrietamiento o elementos con mal ajuste producen un rápido envejecimiento del LED.

Otra falla común se da en los LED blancos, los cuales tienden a emitir una luz más amarilla, y esto se debe a la degradación del material semiconductor, lo cual aparte de cambiar el color de la luz, disminuye la intensidad.

#### *2.7.6.3 Ensamble del LED*

Al ensamblar los LED en tarjetas de circuitos impresos, es necesario usar soldadura para fijarlos, si estas soldaduras son de baja calidad se puede presentar calentamientos excesivos, lo que causa grietas y degradación en los encapsulados protectores, que permiten penetrar contaminantes y humedad no deseada.

### **2.8 CONCLUSIONES DE CAPÍTULO**

Esta parte del proyecto, deja constancia de las opciones de iluminación utilizadas para denotar y destacar la acción de frenado con iluminación en los vehículos que transitan habitualmente por las redes viales nacionales y mundiales. Por otro lado también deja descritos los principios técnicos y físicos de funcionamiento, su evolución y su tendencia futura en el tiempo de los dos tipos de bombillos relevantes para la investigación, y de la misma manera se describen los términos fundamentales para el estudio de confiabilidad de un componente.

### 3 APLICACIÓN

#### 3.1 OBJETIVO DE CAPITULO 3

Registrar el proceso y cifras de vida útil experimental de la investigación sobre bombillos de señal de freno en automotores.

#### 3.2 INTRODUCCION A CAPITULO 3

El capítulo orienta al usuario o lector, en la selección de los elementos a estudiar, y el montaje necesario para instalarlos, describe los componentes eléctricos y electrónicos que deben integrar un banco de pruebas capaz de simular y abastecer de energía a una población significativa de bombillos automotrices de dos tipos, muestra el funcionamiento, partes y componentes que propician el control de encendido necesario, para representar la vida útil de dichos componentes, y finalmente un acercamiento al deterioro y las fallas físicas que se encuentran durante la experimentación en los dos tipos de bombillas a utilizar.

#### 3.3 BANCO DE PRUEBAS

Para llevar a cabo la experimentación se diseña y construye un banco de pruebas. A continuación se describen los componentes eléctricos y electrónicos, que deben integrar dicho montaje, y además el funcionamiento, partes y componentes del control de encendido necesario.

##### 3.3.1 Bombillos

Antes de comenzar cualquier montaje se estudia el mercado disponible al público y los diferentes tipos, marcas y características de las bombillas automotrices, para decidir con base en esta información cuales serían las muestras ideales para la investigación. En las siguientes secciones se describe el estudio y selección de las bombillas a utilizar.

##### 3.3.1.1 Tipos

Los vehículos utilizan el clásico bombillo de filamento incandescente, con la variación en algunos en términos de potencia y conexión por razones de tamaño, función, exclusividad de marcas, entre otros.

Como única alternativa para este de bombillo se encuentra el tipo LED; con algunas variaciones entre los de su clase en términos de número de contactos, tipo de LED, cantidad de LED y tipo de conexión, como en el caso del de filamento incandescente. Este tipo de bombillos se limitan a lugares y almacenes de accesorios y lujos para los vehículos.

##### 3.3.1.2 Marcas

En cuanto a marca, se encuentran diversas en el tipo incandescente, entre las más

comunes está OSRAM (alemana), NARVA (alemana), PHILIPS (holandés), NUAYI (Coreana), entre otras. Las diferencias entre estas radican en la calidad, y por ende en la duración de su producto.

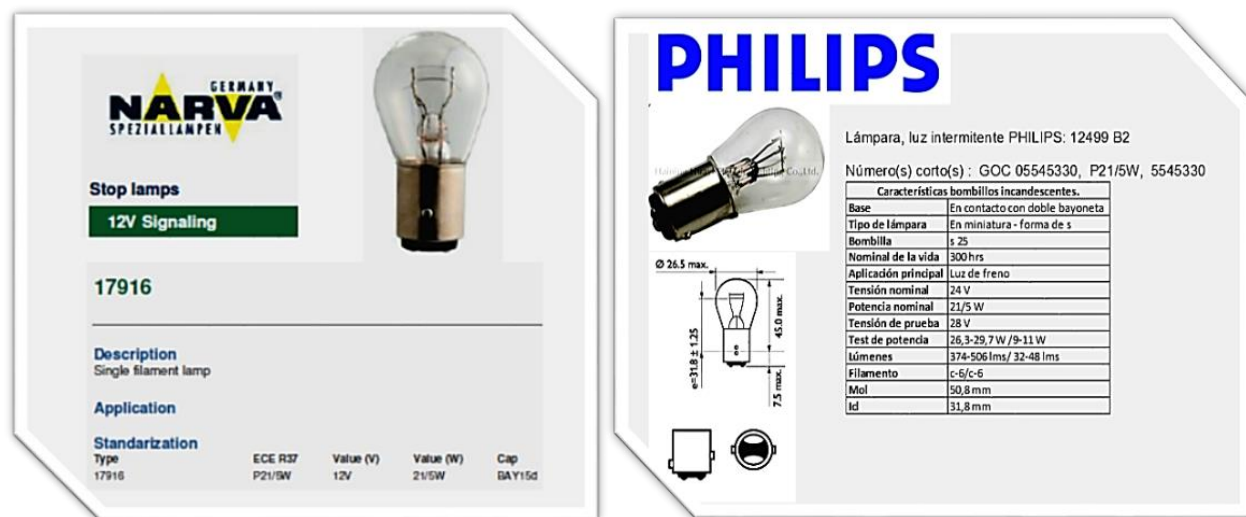
Por otro lado, en los de tipo LED se encuentra una versión nacional y una serie de productos importados de poco reconocimiento en el mercado, y de apariencia poco fiable, tanto por los terminados del producto, como por la falta referencia, registro del país de origen y lugar de fabricación en la leyenda que lleva la caja del producto.

### 3.3.1.3 Precios

Los precios en los bombillos de filamento oscilan entre los \$700 y los \$2000 pesos por unidad, de acuerdo a la marca. Por otro lado los de tipo LED se encuentran entre los \$4000 y \$6000 pesos por unidad, de acuerdo a la cantidad de LED del bombillo. La gran diferencia en precios radica en lo común del bombillo de filamento y la modesta aparición en LED que se tiene en el mercado, sin embargo si se compara en términos de ciclo de vida teórica o esperada, el bombillo incandescente muestra en sus fichas rangos de 300 a 500 horas para el filamento de luz alta, mientras que los tipo LED aunque no tienen ficha técnica, para este tipo se habla de 1000 a 10000 horas teóricas.

A continuación se muestran las fichas técnicas de los algunos de los bombillos que se encuentran en el mercado.

Ilustración 11 - Ficha técnicas de algunos bombillos






Product datasheet **OSRAM**

**7528**

Lamps with metal bases for cars



- Position and parking light
- Indicator, brake, fog and reversing lights
- Number plate and side position lights

**Product benefits**

- OEM Quality
- Wide product range
- Reliable quality

**Product features**

- Original spare parts

**Technical data**

**Electrical data**

Power input	25 / 6 W
Nominal wattage	21 W
Nominal voltage	12 V
Test voltage	13.5 / 13.5 V

**Light technical data**

Luminous flux	440 / 55 lm
---------------	-------------

**Dimensions & weight**

Length	52.5 mm
Diameter	26.5 mm
Product weight	10.50 g

**Nuavi**



Tipo: Luz de la cola Voltaje: 24V

Tipo de la lámpara: Incandescente Certificación: ce

El coche hace: Camiones Lugar del origen: China (continente)

Marca: huayi Número de Modelo: s25 ba15d

Tamaño: 25mm



**Características**

Características bombillo LED Maxim Lighting	
Tensión de operación	10.5 - 15 V
Número de LED	22
Tipo de contacto	BAV15d
Consumo de energía	90-90% menos que un bombillo de filamento
Adicional	Soportan vibraciones

#### 3.3.1.4 Selección de los bombillos

El estudio de oferta de mercado, encuentra que no existen muchos tipos, ni muchas variantes entre la luminaria destinada a la iluminación frenado de vehículos, ya que la gran mayoría de marcas automotrices, comparten el mismo tipo conexión, voltaje y tipo de bombillo.

La información de la sección anterior, da el suficiente detalle para tomar decisiones según el fin de la investigación, por lo que se definen dos referencias de bombillo para el estudio, las cuales se exponen a continuación.

##### 3.3.1.4.1 Bombillo incandescente Narva

Se selecciona la marca Narva Alemana para el estudio, ya que su antigua historia y experiencia en iluminación, hace que su bombillo sea el ideal para unas pruebas de ciclo de vida útil, los procesos de fabricación y los acabados del producto hacen que este sea un adecuado elemento de estudio para el tipo de bombillo de filamento incandescente.

Las características de este bombillo son, 1.8 Amp de corriente continua de

consumo, 12V de voltaje de trabajo y 21W de potencia.

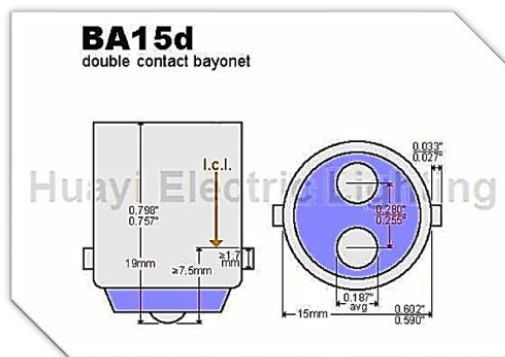
#### 3.3.1.4.2 Bombillo LED Maxim Lighting

Dadas las diferencias que se encuentran en el Mercado, se busca otro bombillo que presente amplias desigualdades con el bombillo de filamento Narva, por este motivo se selecciona el bombillo LED Maxim lighting, el cual posee las mejores capacidades, numero de LED, calidad visual y de acabados, que sus pares competidores.

Las características de este bombillo son, 0.15 Amp de corriente continua de consumo, 10.5 - 15 V de voltaje de trabajo y 1.8W de potencia.

### 3.3.2 Portalámparas

Ilustración 12 - Base bombillo Freno luz freno vehiculo



Las conexiones que los dos tipos de bombillos, son iguales a pesar de sus amplias diferencias en tipo de luz, consumo y precio. Estos cuentan con una terminal de bayoneta de doble contacto, denominada BA15d, como se ilustra en la figura 12.

#### 3.3.2.1 Plástico para empotrar

Esta conexión es la más común y de mayor uso, por lo general la gran mayoría de los vehículos posee en su farola trasera este tipo de portalámparas.

Ilustración 13 - Base bombillo Freno luz freno vehículo



De este tipo de portalámparas existen algunas variaciones no muy significativas, que se basan en la forma de su base de plástico, de acuerdo al tipo de vehículo, los cuales varían las aletas o mecanismos de sujeción a la base del stop, pero que conservan los mismos contactos y materiales.

#### 3.3.2.2 Metálico con platina para atornillar

Este tipo de portalámparas es más escaso y de poca utilización, ya que por lo general los vehículos utilizan el anterior o sus variaciones. Este tipo se utiliza en

camiones o buses, donde varía la forma del stop y sus conexiones, aunque es algo poco común. Esta conexión posee como su material principal metal, un posible bronce o latón por su color verde amarilloso, cuenta con una platina con perforaciones en su base para atornillar.

Ilustración 14 - Base bombillo Freno luz freno vehículo



De este tipo se encuentran variaciones en cuanto a la forma, donde la platina desaparece y se utilizan aletas para empotrar al igual que su versión de plástico, pero se mantiene el material metálico y el contacto de tierra en su base.

#### 3.3.2.3 Selección del portalámparas

Se selecciona el portalámparas metálico con base para atornillar, por su facilidad de sujeción mediante tornillos y la sencilla accesibilidad para la remoción del bombillo o del mismo portalámparas en caso de haber algún tipo de fallo. Estas características facilitan la fabricación y el montaje del banco de pruebas que simulara el funcionamiento de los bombillos en vehículos.

#### 3.3.3 Componentes eléctricos

Se conoce que los bombillos de este tipo operan con corriente directa (continua), por lo tanto las opciones que se tienen para alimentarlos son: utilizar baterías que por su naturaleza proporcionan corriente directa, o transformar la corriente alterna de la red de suministro.

Por practicidad no es viable la opción de usar baterías, pues el consumo energético de este tipo bombillos y la cantidad necesaria de bombillos a probar en simultaneo, induce a que las baterías se descarguen rápidamente, por lo que sería necesario algún tipo de sistema de recarga continua, lo que complica de gran manera el sistema de suministro de energía para los bombillos.

Las anteriores afirmaciones conducen a la conclusión de que es más viable elaborar un circuito que transforme la corriente alterna de suministro a corriente directa, la cual se debe transformar y rectificar de corriente alterna a 110 V y 60Hz, a corriente directa 12 V.

##### 3.3.3.1 Transformador

El transformador es el elemento que se encarga de transformar el voltaje de la corriente, es decir, este elemento reduce el voltaje de entrada en el necesario de

salida, pero no le cambia su variabilidad, es decir, que continua como corriente alterna.

La gran cantidad de bombillos para alimentar, y la necesidad de emular el escenario de trabajo de estos lo más precisamente posible, genera varios requerimientos básicos, ya que para simular estas condiciones, se necesita definir un gran número de variables que definen los límites del sistema y fuente de poder.

Las variables que definen el funcionamiento de estos bombillos son, la cantidad de corriente de consumo, el tipo de corriente, el voltaje de trabajo y el consumo de potencia.

### 3.3.3.1.1 Consumo de potencia del sistema

Según las especificaciones de los bombillos que se usan para el estudio, se manifiesta una amplia diferencia en cuanto a consumos de corriente y potencia, por lo que se determina, que el mayor porcentaje de consumo se atribuye a los bombillos de filamento incandescente, ya que los tipos LED presentan un consumo bastante bajo en comparación a sus pares.

Se procede a realizar los cálculos, que definen el consumo de energía total, la corriente necesaria para energizar todo el banco, el voltaje de funcionamiento y la potencia precisa para que el circuito tenga un funcionamiento correcto.

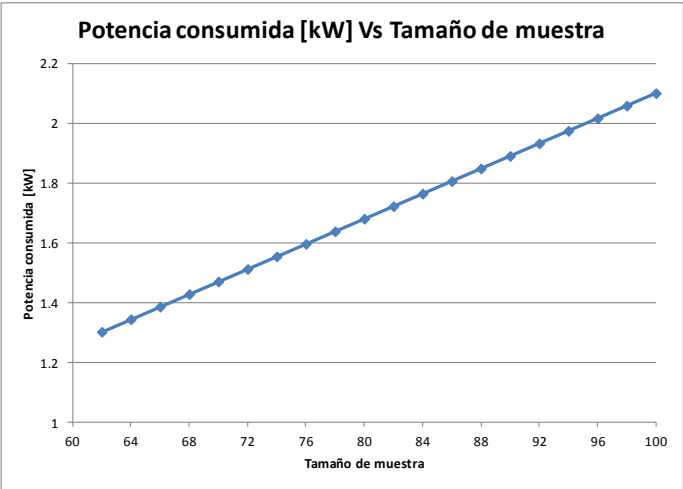
A continuación se muestran algunas tablas donde se presentan los cálculos de consumo de potencia y corriente, para muestras de 31 bombillos en adelante.

Tabla 2 - Potencia de consumo Bombillo Incandescente

Consumo de potencia bombillos incandescentes			
Tamaño de muestra	Potencia consumida [kW]	Tamaño de muestra	Potencia consumida [kW]
62	1.3	82	1.72
64	1.34	84	1.76
66	1.39	86	1.81
68	1.43	88	1.85
70	1.47	90	1.89
72	1.51	92	1.93
74	1.55	94	1.97
76	1.6	96	2.02
78	1.64	98	2.06
80	1.68	100	2.1

La tabla ilustra cómo se incrementa el consumo de potencia a medida que se incrementa el número de bombillos del tipo de filamento incandescente.

Ilustración 15 - Gráfica de consumo bombillos de filamento



Como se aprecia en la gráfica el consumo de los bombillos de filamento es bastante alto y varía de los 1.3 kW con una muestra de 62 bombillos hasta 2.1 kW con una muestra de 100 bombillos.

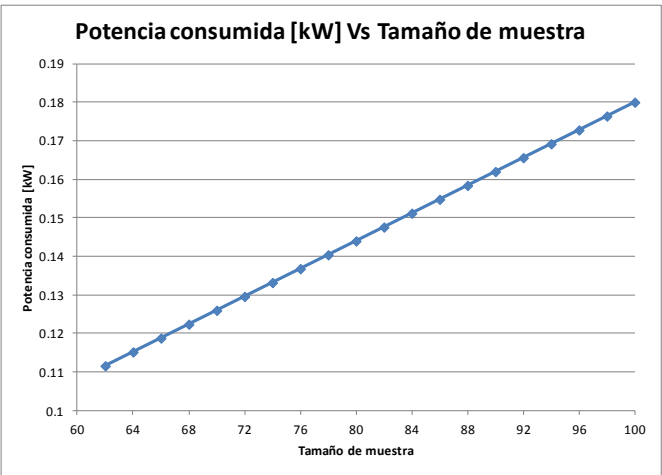
A continuación se realiza el mismo análisis que se efectúa para los bombillos de filamento, pero esta vez para los de tipo LED.

Tabla 3 - Potencia de consumo Bombillo LED

Consumo de potencia bombillos LED			
Tamaño de muestra	Potencia consumida [kW]	Tamaño de muestra	Potencia consumida [kW]
62	0.11	82	0.15
64	0.12	84	0.15
66	0.12	86	0.15
68	0.12	88	0.16
70	0.13	90	0.16
72	0.13	92	0.17
74	0.13	94	0.17
76	0.14	96	0.17
78	0.14	98	0.18
80	0.14	100	0.18

La tabla ilustra cómo se incrementa el consumo de potencia a medida que se incrementa el número de bombillos de tipo LED.

Ilustración 16 - Gráfica de consumo bombillos LED



En el gráfico anterior se aprecia el incremento de consumo de potencia de los bombillos LED desde 62 hasta 100 unidades, en este se evidencia un consumo mucho más bajo en cuanto al de filamento, con un dato inicial de 0,112 kW para 62 unidades, hasta 0.180 kW para 100.

Comparando los dos tipos de bombillos, se encuentra que en

cuanto a consumo de potencia eléctrica los bombillos de filamentos consumen 11.67 veces más que los bombillos LED, mientras que para una muestra de 31 bombillos de filamento se tiene un consumo de 1.3 kW, para la misma cantidad pero con LED, se obtiene un consumo de 0.11 kW.

#### 3.3.3.1.2 Consumo de corriente del sistema

La fuente de energía que posee un vehículo es su batería, esta mantiene su carga estable por la interacción que constantemente mantiene con el alternador, el cual continuamente la recarga. Este proceso hace que sea posible sin ningún impedimento el uso de bombillos de filamento incandescente.

Para realizar la simulación experimental de la vida útil de los bombillos para una población considerable, se debe contar con una fuente de poder con las características suficientes para abastecer la demanda de carga.

Las mediciones y el registro de fallos de los bombillos, deben realizarse sin afectar el funcionamiento de los que puedan seguir en funcionamiento, es decir, los fallos que se presenten en las diferentes poblaciones, no debe afectar de ninguna manera el funcionamiento constante de los que siguen en buen estado.

Para lograr este objetivo, el circuito de bombillos se debe conectar en paralelo, lo que garantiza que el fallo de uno, no afecte el paso de energía a los otros y puedan funcionar de manera independiente. Este tipo de conexión hace que las corrientes de consumo se sumen de acuerdo al número de elementos en conexión, esta información es vital para calcular la carga que debe poder soportar la fuente.

A partir de la fórmula de cálculo de consumo de corriente para un circuito en paralelo, se calcula el consumo del banco de pruebas, para definir las características que debe tener la fuente de poder.

Tabla 4 - Consumo de corriente total del sistema

Tipo de bombillo	Consumo corriente [A]	Consumo 100 unidades [A]	Consumo total [A]
Incandescente	1.8	180	<b>195</b>
LED	0.15	15	

Según la tabla anterior la fuente de poder debe abastecer con 195 amperios el circuito para

poder energizar 200 bombillos en total.

#### 3.3.3.1.3 Características de la fuente de poder del sistema

Finalmente de acuerdo a los cálculos anteriores, se definen las especificaciones del transformador, de manera que pueda alimentar el sistema en condiciones normales de trabajo; estas especificaciones se enuncian a continuación:

Tabla 5 - Especificaciones del transformador

Característica	Valor
Potencia	<b>2 Kva</b>
Voltaje de entrada	<b>110 voltios</b>
Voltaje de salida	<b>12 voltios</b>
Corriente de entrada	<b>20 amperes</b>
Corriente de salida	<b>245 amperes</b>

### 3.3.3.2 Platinas para conducción de corriente

Para la conducción y distribución de corriente, se utilizan dos platinas de cobre de espesor y ancho determinado para distribuir la energía a través de todo el banco, estas hacen el puente de conexión entre la corriente que llega del transformador y los puentes rectificadores.

Estas platinas dan facilidad en el trabajo de conexiones aportando mucho más orden en las conexiones, en comparación con las que se pueden obtener elaborando el circuito con cable.

### 3.3.3.3 Breakers

Ilustración 17 - Breaker



Para evitar el daño de los bombillos ante un eventual cortocircuito, un pico de voltaje o simplemente para interrumpir el paso de la corriente a las líneas de bombillos, es necesario tener una protección y un interruptor antes de cada puente rectificador.

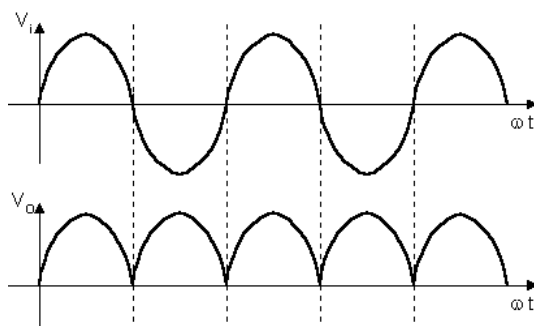
Esta función la cumplen breakers termo-magnéticos los cuales tienen como función tanto la de interrumpir la corriente como la de proteger el circuito.

### 3.3.3.4 Puentes Rectificadores

La transformación de corriente de alterna a continua, se realiza por medio de puentes rectificadores de corriente, que convierten la oscilación sinusoidal de la corriente alterna en una corriente rectificada pulsante.



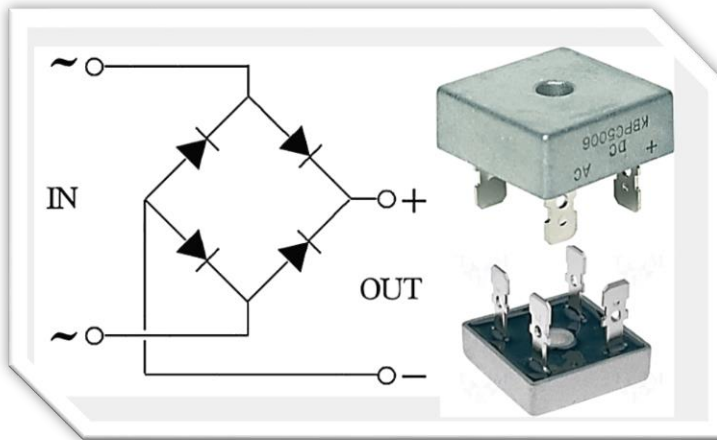
Ilustración 18 - Rectificación de Onda Sinusoidal de Corriente alterna



La manera más eficaz y apropiada que se encuentra para la energización del sistema, es la de dividir la corriente por líneas de bombillos, de manera que el cableado y los puentes rectificadores, no deban tener unas especificaciones bastante exigentes, para soportar toda la carga proveniente de la fuente, sino dividir la corriente de salida en varias ramificaciones de más bajo amperaje, donde se puedan utilizar calibres

de cable más delgados, comunes y sencillos, y además puentes rectificadores de menor capacidad, más económicos y fáciles de adaptar a las conexiones.

Ilustración 19 - Puente rectificador de corriente



El consumo por línea de bombillos está dada por su tipo, es decir, mientras que la línea de bombillos de filamento incandescente necesita de 18 a 20 amperios, una de LED solo necesita de 1.5 a 2 amperios para los mismos 10, por ese motivo se definen puentes rectificadores que puedan suplir una línea de bombillos de filamento.

De acuerdo a lo anterior se seleccionan puentes rectificadores con una capacidad de 35 Amp, la cual es suficiente para soportar el consumo de la línea de bombillos de filamento o de energizar varias líneas de LED.

### 3.3.3.5 Condensadores

Los puentes rectificadores no entregan una corriente tan estable como la directa de las baterías, pues si bien después de pasar por los puentes la corriente ya no es alterna, ésta todavía no es totalmente continua pues presenta pulsaciones, es decir, que si se trabaja únicamente con puentes no se está simulando a la perfección la corriente eléctrica que le proporciona una batería a los bombillos.



Ilustración 20 - Condensadores



Para resolver este inconveniente es necesario adicionar otro elemento al circuito para normalizar aún más la corriente. Con este fin se instalan condensadores, cuya función es la de almacenar la corriente que entregan los puentes y entregarla completamente rectificada. Estos condensadores se ubican justo después de los puentes y antes de la línea de bombillos, con el fin de rectificar por completo la corriente de salida de los puentes rectificadores.

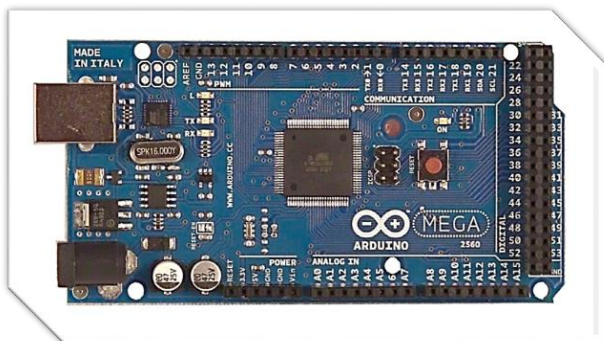
### 3.3.4 Componentes electrónicos y controladores

Para controlar el encendido de cada línea de bombillos y simular una secuencia de frenado, se deben integrar una serie de componentes electrónicos que trabajen en conjunto para permitir, encender y apagar cada línea de bombillos por separado por medio de un algoritmo que se carga en un microcontrolador. La serie de componentes que se necesita para este control automático se expone a continuación.

#### 3.3.4.1 Microcontrolador

El microcontrolador es el elemento principal del subsistema de control, este elemento es el que permite regular los tiempos de encendido y apagado de los bombillos. El micro controlador es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria pues posee pines de entrada y de salida, y con la lectura que obtiene de las entradas puede decidir sobre las salidas.

Ilustración 21 - Arduino® Mega2560



Para la investigación se usa el micro controlador Arduino® Mega2560. El Arduino es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexible, el Arduino es un circuito integrado que contiene toda la estructura de un ordenador (CPU, memoria RAM, memoria ROM y conexiones de entrada/salida).

Para el control de los bombillos no se usan las entradas del micro controlador, es decir, que el control de los bombillos va a ser cíclico y no va a depender de ningún

pulsador o sensor. A continuación se muestra un plano esquemático del Arduino donde están marcadas sus salidas y entradas.

Ilustración 22 - Plano esquemático del Arduino

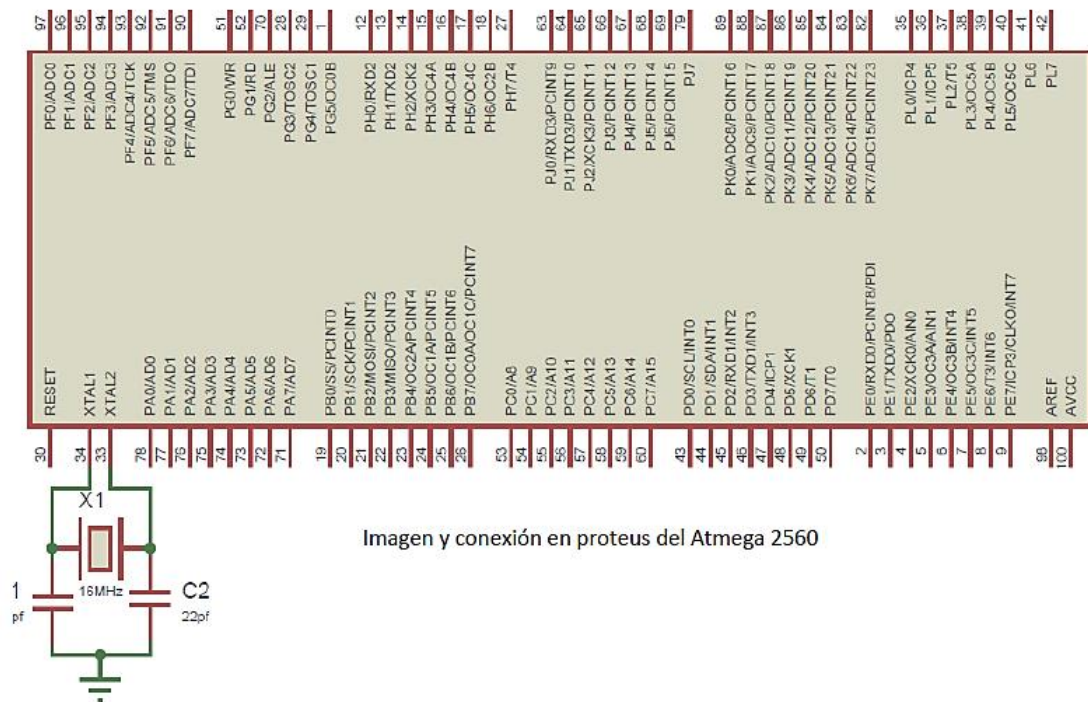
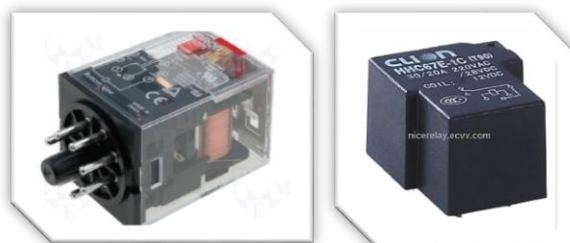


Imagen y conexión en proteus del Atmega 2560

### 3.3.4.2 Relés

Los relés o relevadores son elementos electromecánicos los cuales cumplen la función directa de interrumpir la corriente eléctrica que alimenta a los bombillos. Los relés están compuestos por una bobina, que mediante la inducción electromagnética genera un campo magnético, una armadura cuya función es pivotar para abrir o cerrar los contactos de acuerdo a si hay o no hay, un campo magnético y contactos que son los elementos de interés en el relé, estos contactos están cerrados o abiertos de acuerdo a la posición a la que esté la armadura.

Ilustración 23 - Relé



El conjunto de elementos funciona de la siguiente manera: A partir de un circuito de bajo voltaje y corriente se energiza la bobina, esta al ser energizada crea un campo magnético el cual atrae la armadura hacia el núcleo de la bobina, debido a que la armadura pivota sobre un punto esta hace cerrar o abrir los

contactos (de acuerdo al tipo de relé, si es normalmente abierto o normalmente cerrado). El relé se usa para interrumpir el paso de la corriente (circuitos eléctricos) a partir de corrientes pequeñas (circuitos electrónicos), es decir, si el relé recibe corriente.

### 3.3.4.3 Transistores

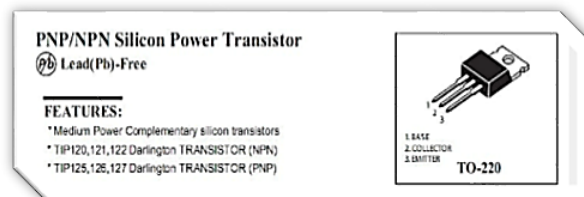
La corriente que van a consumir las líneas de bombillos LED es muy baja, por este motivo para interrumpir la corriente de estos, no se usan relés si no transistores. Una de las funciones de los transistores es la de dejar o no pasar la corriente a partir de una señal de entrada. Las partes de un transistor son la base, el colector y el emisor.

Si no hay corriente base (corriente de control) entonces el transistor no permite el paso de corriente entre el colector y el emisor, esta condición del transistor se conoce como estado de corte.

Si hay una corriente base entonces el transistor deja de interrumpir el paso de corriente, esta pasa entre el colector y el emisor, este estado es conocido como estado de saturación.

En el caso de los bombillos en particular, cuando el transistor está en estado de corte los bombillos estarán apagados y cuando pase a estado de saturación los bombillos estarán encendidos.

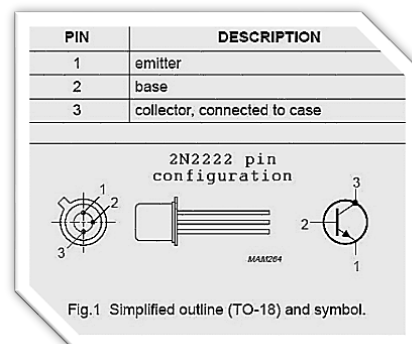
Ilustración 24 - Transistor TIP 121



Los transistores que se utilizan para controlar el encendido y apagado de los bombillos LED, son los transistores de tipo TIP 121, los cuales reciben directamente la señal desde el microcontrolador, dando accionamiento al puente que da el

paso de corriente que alimenta los bombillos LED.

Ilustración 25 - Transistor 2N2222

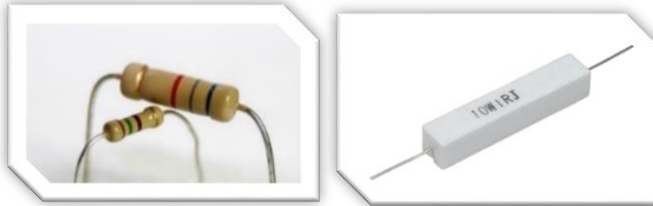


Los bombillos de filamento utilizan otra clase de transistores, del tipo 2N2222, los cuales se usan para recibir la señal del Arduino®, y a partir de esta controlan el paso de corriente por la bobina de cada relé, quien se encarga de cerrar o abrir los contactos, los cuales son el puente de alimentación de los bombillos de filamento.

#### 3.3.4.4 Resistencias

Una resistencia es un elemento electrónico que se opone al paso de la corriente, cuando la corriente eléctrica pasa a través de una resistencia esta disminuye de voltaje.

Ilustración 26 - Resistencias

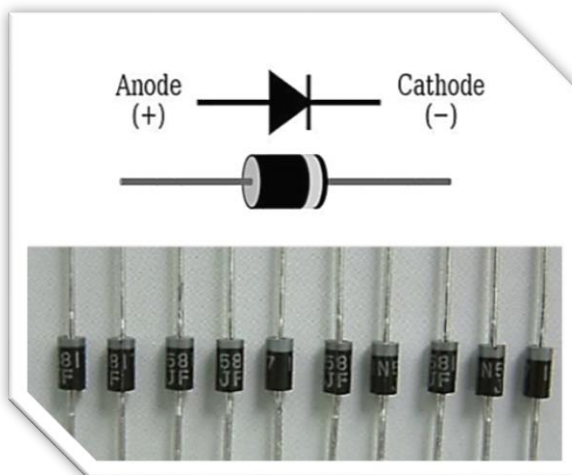


La función de disminuir el voltaje es necesaria para que el voltaje de las salidas del micro controlador se reduzca, con el fin de permitir el funcionamiento correcto de los transistores. El valor de las resistencias que se usan en este montaje es de 1 k $\Omega$ .

#### 3.3.4.5 Diodos

Los diodos son elementos electrónicos que permiten el paso de corriente en un solo sentido. Se sabe además que las corrientes que controlan tanto los transistores como los relés son considerablemente pequeñas, ya que provienen del micro controlador.

Ilustración 27 - Diodo



Si por algún motivo a las salidas del micro controlador llega una corriente (en vez de salir), se pueden causar daños en el componente, por lo tanto se instalan diodos, los cuales, si por algún motivo hay un retroceso de corriente y se devuelve hacia alguna salida del Arduino®, el diodo no permitirá su paso, lo cual evita daños considerables en el microcontrolador.

La ilustración 27 muestra la descripción de las terminales del diodo, donde se sabe que la corriente puede circular del ánodo al cátodo pero no al contrario.

#### 3.3.4.6 Circuito impreso

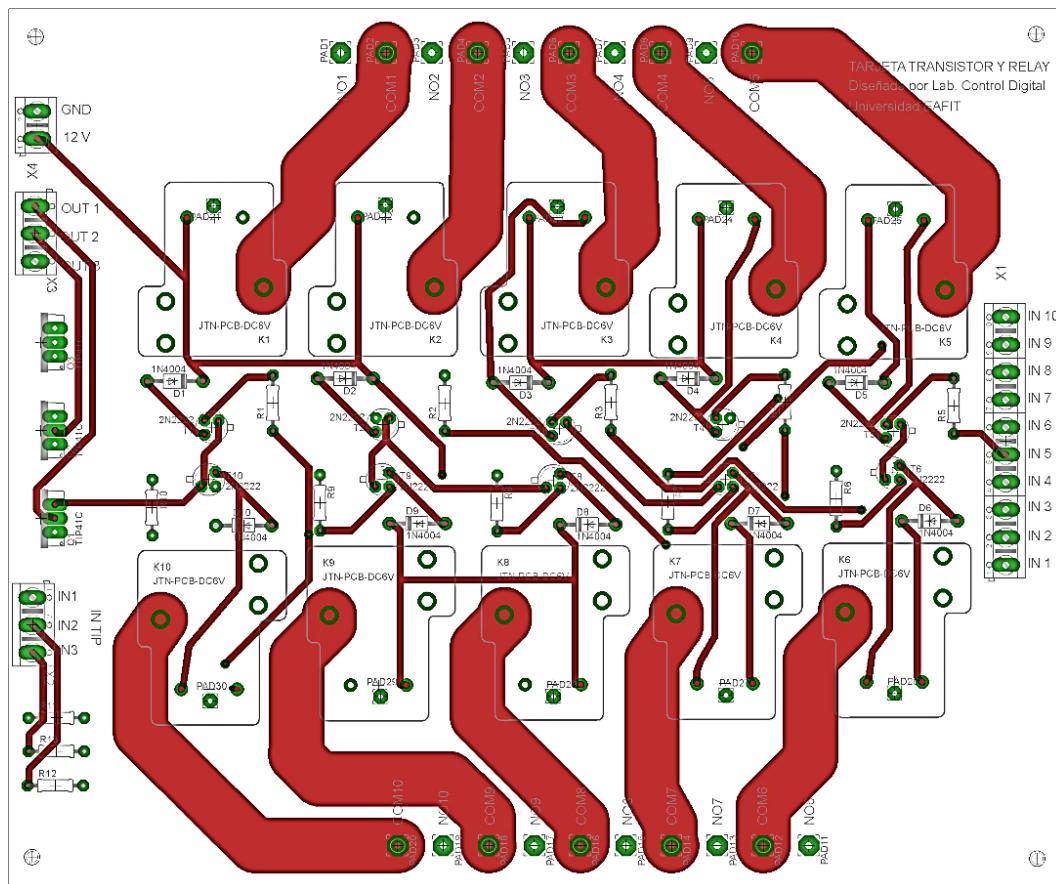
El circuito impreso es una tarjeta de material no conductor dentro de la cual hay pistas de material conductor. La función del circuito impreso es conectar y sostener los elementos que constituyen un circuito de manera ordenada.

Los materiales aislantes de los que están hechas las tarjetas por lo general son cerámicas, teflón o polímeros, mientras que el material que más se usa para las pistas es el cobre.

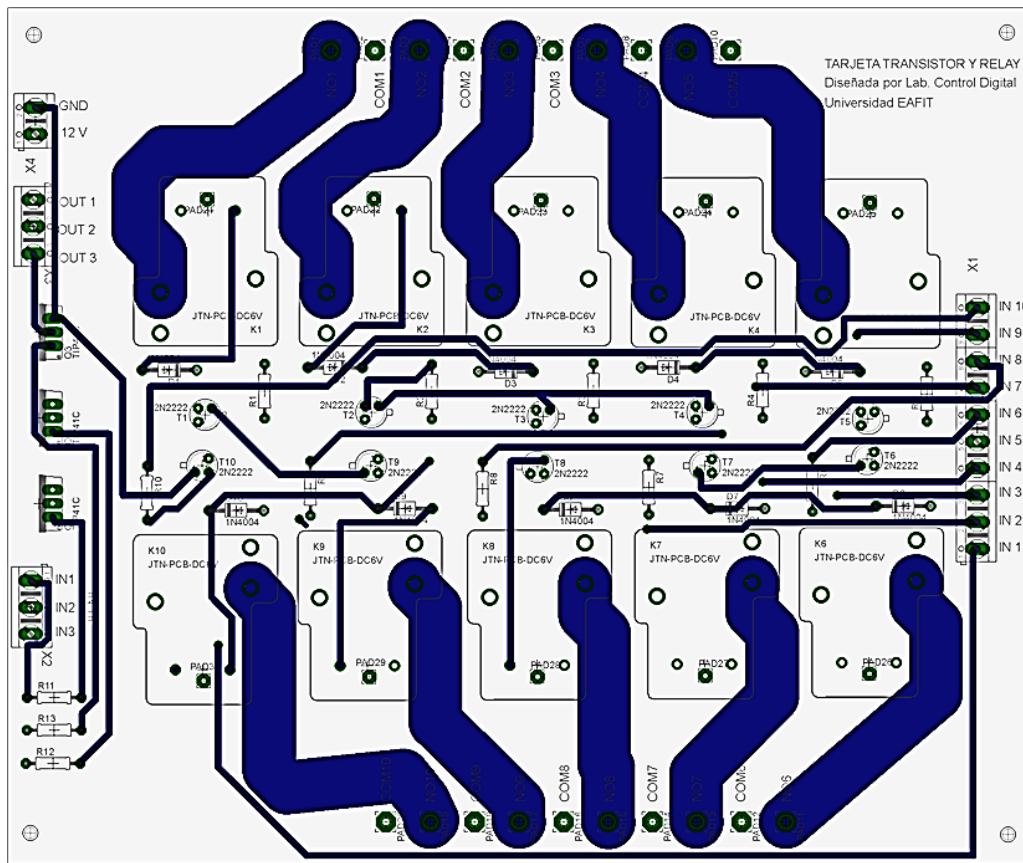
Las tarjetas están fabricadas en capas, es decir, hay pistas conductoras separadas por capas de material aislante, esto es útil cuando hay una cantidad numerosa de pistas y estas se entrecruzan en el diseño pero no se deben tocar en la tarjeta, por lo tanto las pistas se hacen en capas diferentes separadas por material aislante.

La tarjeta que se diseña para el control del banco de pruebas está compuesta por dos capas. Los circuitos impresos se fabrican a partir de un plano con las necesidades y funcionamiento del circuito, actualmente el diseño de los circuitos impresos se hace por medio del computador, en la siguiente ilustración se muestra el diseño de la tarjeta en el software Eagle®.

Ilustración 28 - Capas superior e inferior Circuito impreso







### 3.3.5 Diseño y construcción banco de pruebas y de caja de circuitos

Para el estudio de confiabilidad de los bombillos, se requiere de un espacio propicio donde se simule lo más precisamente posible el entorno donde normalmente se utilizan, es decir, en automóviles, camiones, buses o motocicletas, y además que se realice en simultáneo para una muestra considerable de estos.

Definir un espacio con las características que se mencionan anteriormente, da la posibilidad de obtener un conjunto de datos de falla suficiente y preciso, que posteriormente sea base para realizar análisis, cálculos, y conclusiones estadísticas, que arrojen resultados valederos para dar determinaciones acerca de la confiabilidad y la validación o cumplimiento de la ubicación de estos dispositivos en la fase tres de la curva de Davies, como elementos no reparables.

De acuerdo a lo anterior el banco debe cumplir con las siguientes características:

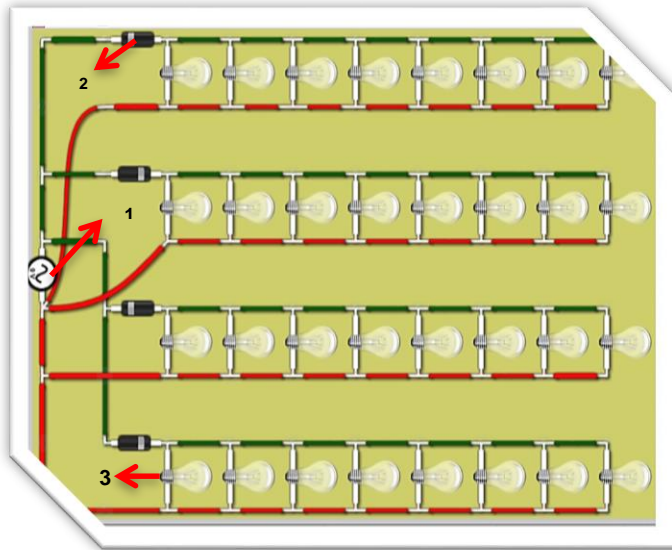
- Tamaño suficiente para ubicar los elementos necesarios.
- Material apropiado para soportar el peso y calor que se genere.
- Material de fácil maquinado y maniobrabilidad.

Para elaborar el diseño del banco es necesario tener claro el tamaño de la muestra

de bombillos y la distribución que van a tener los dispositivos eléctricos que se encargan del funcionamiento de estos.

A continuación se muestra un diagrama de conexiones de cuatro líneas de 10 bombillos conectadas en paralelo, el cual ejemplifica la forma en que se realiza para la totalidad de las líneas del banco de pruebas.

Ilustración 29 - Diagrama de conexión Banco de Pruebas



El diagrama pretende ilustrar como serán las ramificaciones desde la fuente para poder contar con dispositivos electrónicos de menores especificaciones; en el diagrama se puede resaltar, que de la fuente sale un cable único para cada línea y que antes de llegar a los bombillos pasa por un puente rectificador independiente para cada línea de bombillos, de esta forma, la cantidad de bombillos a energizar por línea, es mucho

más baja, lo que se traduce en una menor cantidad de corriente a rectificar y transmitir, lo que permite incluir los dispositivos electrónicos con las especificaciones que se desean.

De este modo el circuito se conforma de la siguiente manera: se instala un puente rectificador independiente para cada línea de bombillos incandescentes y para los bombillos LED se utiliza un puente para tres o cuatro líneas de estos.

Con base en los cálculos de potencia y corriente de la fuente, se decide que la muestra a estudiar es de 100 bombillos de cada tipo (LED e incandescente), los cuales se distribuyen en líneas de bombillos conectados en paralelo entre sí.

Cada muestra de 100 bombillos se distribuye en 10 líneas, para cada línea de bombillos incandescentes un rectificador, es decir 10 puentes para las 10 líneas, los tipo LED por su bajo consumo de energía y a la poca corriente de consumo, las 10 líneas de bombillos estarán a cargo de tres puentes rectificadores de la siguiente manera: dos puentes con dé a tres líneas de bombillos, y un último con las cuatro líneas restantes.

La corriente que pasa por los puentes rectificadores, genera calentamiento excesivo, por lo tanto como medida preventiva para evitar la falla de estos





A continuación se muestra una serie de imágenes donde se observa la construcción del marco.

Ilustración 31 - Imágenes construcción marco banco de pruebas



#### 3.3.5.2 *Diseño y construcción de caja de circuitos*

Las conexiones para energizar adecuadamente los bombillos son complejas y necesitan un gran número de elementos electrónicos para cada número y tipo determinado de bombillos. Por este motivo, se opta por crear un espacio independiente que albergue, ordene, ubique e interconecte todos los circuitos previos para todo el montaje.

Para definir las dimensiones de dicho espacio, se basa en la información sobre la distribución de las conexiones, la cantidad de elementos a conectar y su tipo, el orden de conexión y la estructura del sistema.

Además de incluir disipadores de calor de aluminio para disipar el calor de los puentes rectificadores, se toma otra medida preventiva para el recalentamiento de los componentes, por lo que se instalan extractores de aire (ventiladores), a través de todo el circuito, con la idea de que se logre una muy buena transferencia de calor



Las pruebas preliminares del banco se registraron y realizaron bajo un seguimiento fotográfico, para ilustrar el paso a paso de las pruebas, sus resultados y el avance de cada ensayo con los primeros bombillos.

Ilustración 33 - Imágenes Pruebas preliminares



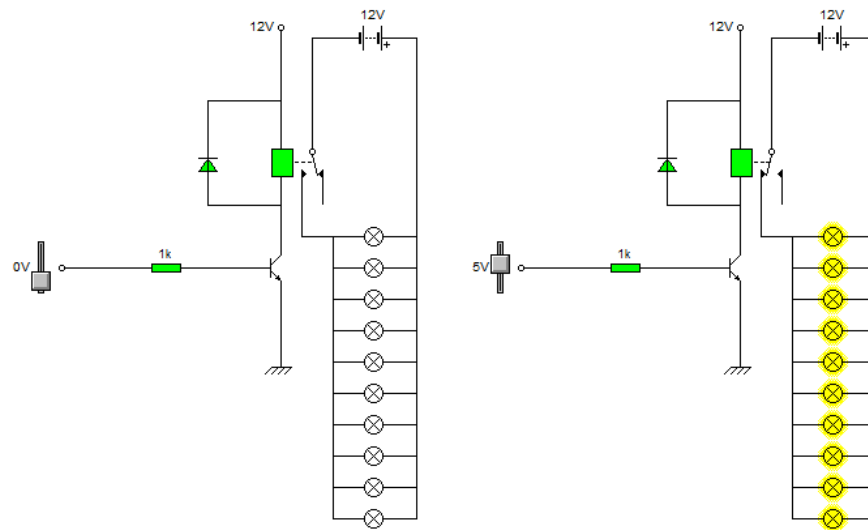
#### 3.3.6.2 Conexión y funcionamiento del control de encendido de los bombillos Incandescentes y LED

Previamente se define y describe todos los componentes que conforman la tarjeta electrónica, a continuación se explica la manera cómo se ensamblan estos componentes para llevar a cabo la tarea de abrir y cerrar el paso de corriente hacia los bombillos de acuerdo a un algoritmo específico.

En la siguiente ilustración se muestra simbólicamente la manera cómo se conectan los componentes para controlar el paso de corriente en los bombillos incandescentes.

Estos componentes se posicionan en el circuito impreso y se conectan entre sí mediante las pistas que este posee.

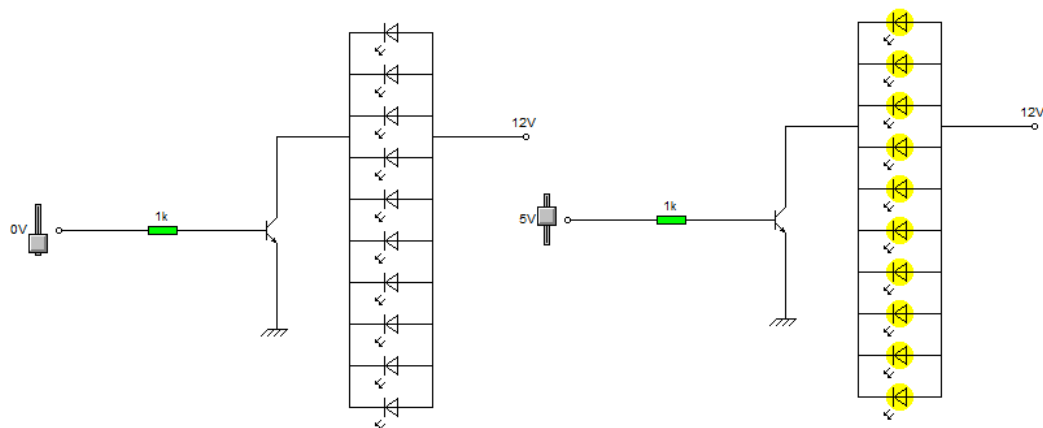
Ilustración 34 - Esquema de conexión del control de encendido de los bombillos Incandescentes



En la anterior ilustración se muestra que la señal de 5V que envía la salida del Arduino® (microcontrolador), primero debe pasar por una resistencia para disminuir el voltaje, luego la señal llega a la base del transistor 2N2222, lo que permite el paso de corriente por la bobina del relé; cuando se energiza la bobina del relé los contactos del relé se cierran y hacen que circule la corriente por los bombillos. En la primera ilustración se muestra que el Arduino® no está enviando ninguna señal, es decir que la señal para la base del transistor es 0V, y por ende el contacto del relé está en la posición de normalmente abierto, cuando el Arduino® envía la señal, el contacto del relé cambia de posición y se encienden los bombillos.

A continuación se muestra el esquema de conexión de los elementos que controlan el paso de corriente hacia los bombillos LED, el cual presenta variaciones con respecto al que se plantea anteriormente para los de tipo incandescente.

Ilustración 35 - Esquema de conexión del control de encendido de los bombillos LED



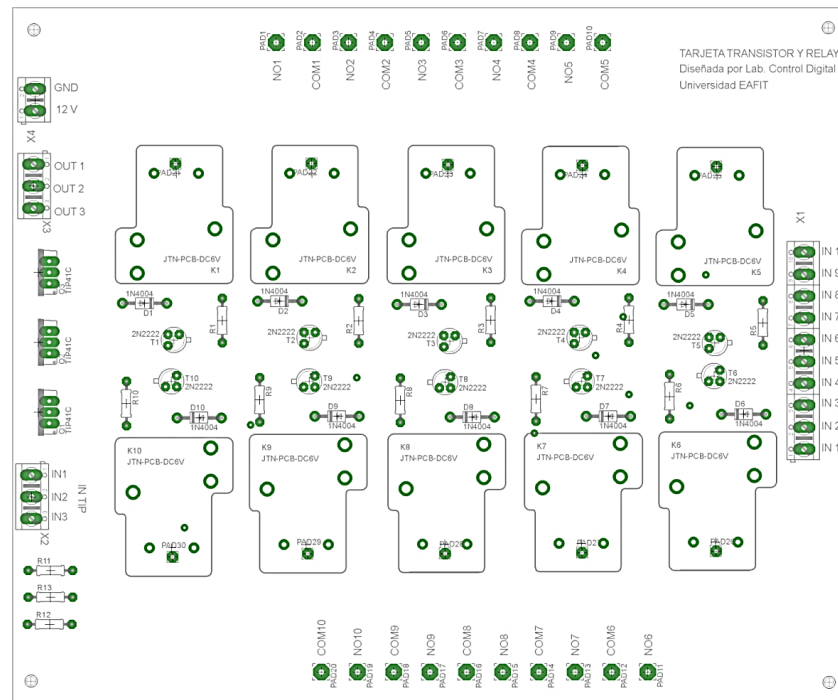
En el anterior esquema se observa que la señal de 5V que sale del Arduino® pasa por la resistencia para disminuir el voltaje de la misma, luego esta entra a la base del transistor TIP 41C lo que permite que el transistor pase del estado de corte al estado de saturación, cuando el transistor llega a esta condición, se cierra el circuito que alimenta a los bombillos LED.

Previamente se define que los bombillos incandescentes se dividen en 10 líneas, y que cada una alberga 10 bombillos conectados en paralelo. Las líneas se controlan independientemente, por lo tanto cada una de las líneas cuenta con un relé que controle su encendido y apagado, es decir que se usan 10 relés para controlar las 10 líneas de bombillos incandescentes.

Al igual que los bombillos incandescentes, la muestra de LED que se tiene es de 100 unidades, pero a diferencia de los incandescentes, los LED no se organizan por líneas de 10 bombillos; estos por a su bajo consumo de corriente se ordenan en 2 grupos de 30 bombillos y un grupo de 40 bombillos, por lo tanto se controlará el encendido y apagado de cada uno de estos grupos, únicamente con tres transistores TIP 41C.

A continuación se muestra el mapa de elementos electrónicos en la tarjeta, en la cual se observa donde se ubican los elementos que se mencionan anteriormente, exceptuando el microcontrolador el cual posee su propia tarjeta y entorno de hardware, como se explica en secciones anteriores, por lo que solo se conecta mediante cableado a las diferentes entradas diseñadas en la tarjeta.

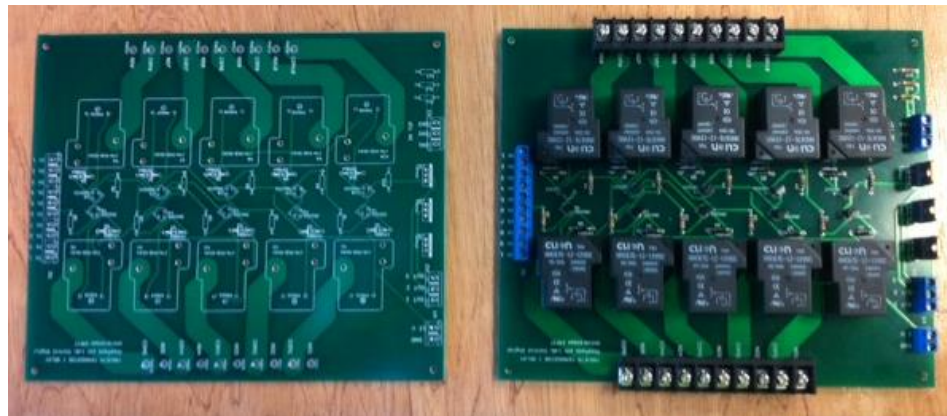
Ilustración 36 - Circuito impreso con marcación de componentes





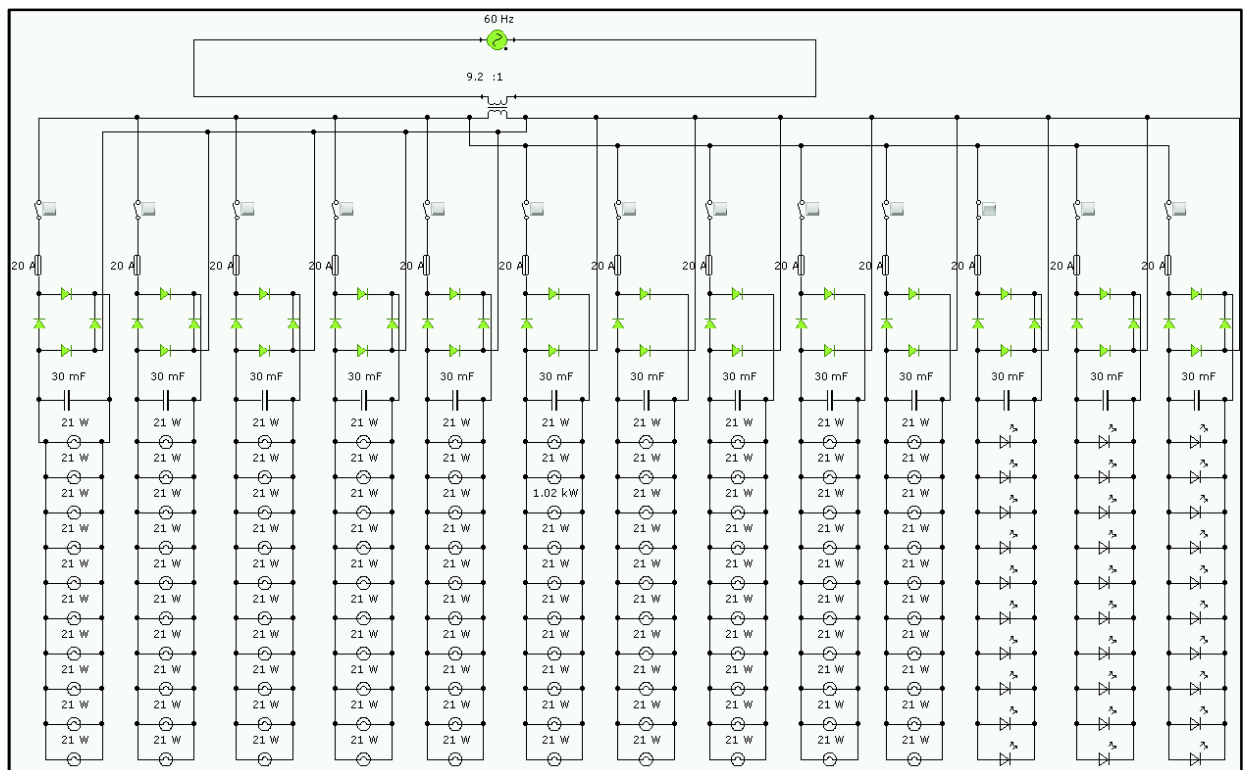
El ensamble de todos los elementos electrónicos se observa en la siguiente imagen, donde se enfrentan la tarjeta sin componentes y la misma con todo el ensamble.

Ilustración 37 - Tarjeta electrónica - ensamble elementos electronicos



Finalmente para dar a entender el esquema completo de conexiones, se hace el plano que contiene todos los componentes que van a estar trabajando en conjunto para la simulación. A continuación se muestra el plano eléctrico de todo el circuito.

Ilustración 38 - Plano eléctrico de todo el circuito



### 3.3.7 Control de encendido y apagado

Para simular el ciclo de vida útil de los bombillos y generar la fatiga que estos reciben trabajando en los vehículos, se programa un algoritmo de control en el microcontrolador Arduino, para que según este, se manejen los relés y transistores que dan el paso de corriente a los bombillos. A partir de este código se dan los tiempos y secuencia de encendido según se disponga para la experimentación, la secuencia de accionamiento y los parámetros que se toman en cuenta para decidir los tiempos se describe a continuación.

#### 3.3.7.1 *Parámetros de tiempos de accionamiento*

Existe poca información sobre cómo se formulan pruebas de vida para este tipo específico de bombilla, sin embargo algunas empresas asignan un tiempo estándar de encendido y descanso contante, con los que prueban hasta lograr el fallo del bombillo.

Para la investigación se decide basar este tiempo estándar con alguna variable que se relacione con sitio de trabajo el bombillo, para lograr este fin y simular de la manera más adecuada el uso real de los bombillos, se calcula cuanto se demora un automóvil en promedio para frenar completamente a diferentes velocidades a partir de la distancia de frenado.

Ilustración 39 - Distancias de frenado a diferentes velocidades



La ilustración anterior muestra que distancia recorre un vehículo frenando a diferentes velocidades, a partir de estas distancias y las fórmulas de velocidad de la física, se obtiene el tiempo de accionamiento del freno durante este recorrido, con base en la premisa de que desde el punto cero se inicia el frenado y en la distancia final se suelta el freno.

Ilustración 40 - Tiempo de frenado a diferentes velocidades

Velocidad [km/h]	Tiempo de frenado [s]
40	2.8
50	3.2
60	3.7
70	4.3
80	5
90	5.6
100	6.1
110	6.8

Con base en los tiempos de frenado a diferentes velocidades, se opta por que los bombillos estén encendidos en ciclos donde se simule que el automóvil frena por determinado tiempo, pasa un tiempo sin que el conductor frene, y repite esta secuencia por un número específico de ciclos que abarquen veintitrés horas de trabajo diario.

#### 3.3.7.2 Algoritmo de control

Para la investigación se decide un tiempo estándar de accionamiento contante de un frenado de un vehículo que viaja a 100km/h, al que le toma en promedio un poco más de seis segundos para reducir su velocidad a cero, sin embargo para efectos de cálculo se toman los seis segundos completos como parámetro de encendido con el cual se prueban hasta llegar al fallo del bombillo.

El ciclo de control consiste en que se simule cuando un vehículo frene desde 100km/h hasta detenerse por completo, descanse un lapso determinado de tiempo y repita esto la cantidad de ciclos finita programada en el microcontrolador. Para evitar el calentamiento excesivo de los elementos del circuito y para disminuir el consumo de energía, se prefiere plantear un control donde una fracción de la población va a estar en funcionamiento cuando la población restante esté apagada.

El control se plantea de maneras diferentes para los dos tipos de bombillos, para los incandescentes se plantea el ciclo de frenado constante para generarles más fatiga, pero para los LED, ya que estos no se ven afectados por la intensidad de encendido, se plantea un ciclo que tenga más tiempo continuo, que suicheo, sin embargo los dos ciclos se encuentran bajo el mismo algoritmo de programación que se descarga en el microcontrolador.

La muestra que se tiene está dividida en 10 líneas con bombillos incandescentes y 10 líneas con bombillos LED, para satisfacer las premisas que se enuncian anteriormente, en el algoritmo de control se plantea una secuencia que enciende un número de líneas en primera instancia y en simultaneo cuando cumplen el tiempo de accionamiento se pagan y prenden las siguientes, de manera que al final de un ciclo todos los bombillos de un tipo han encendido el mismo número de veces.

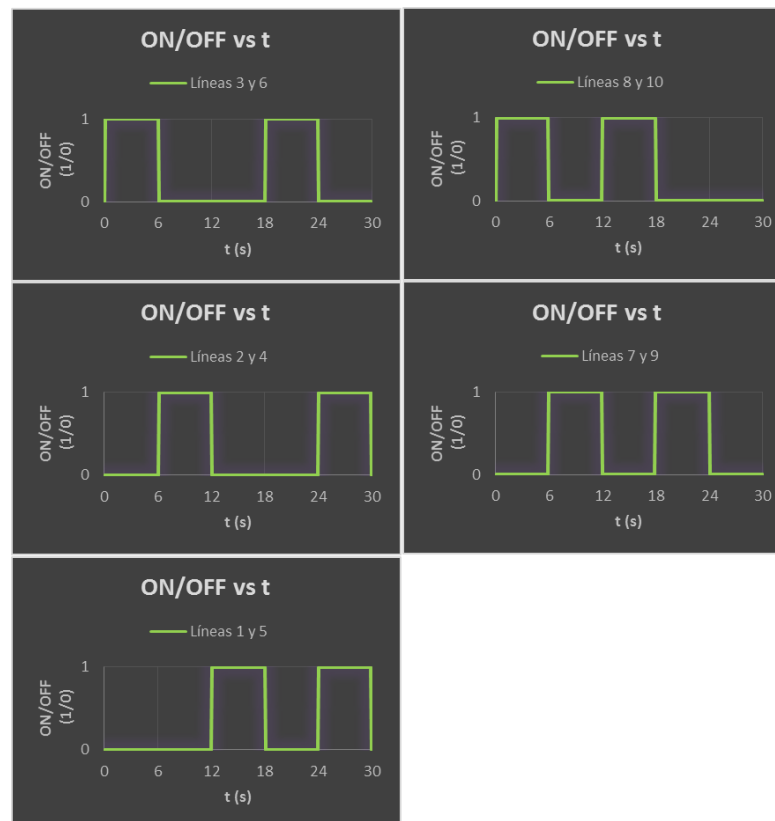
El ciclo completo de los bombillos incandescentes tarda 30 segundos en total, donde



cada bombillo se enciende en dos ocasiones durante 6 segundos, con dos tiempos de descanso entre accionamientos de 6 y 12 segundos respectivamente. En una hora de funcionamiento cada bombillo permanece en funcionamiento durante el 40% del tiempo, es decir, 24 minutos de cada 60 y se enciende unas 240 veces, para un total de trabajo diario encendido de 9.2 horas.

El ciclo de accionamiento de los bombillos incandescentes en palabras puede expresarse de la siguiente forma: inmediatamente encendido el microcontrolador, se encienden las líneas 3 - 6 - 8 - 10, pasan 6 segundos y estas líneas se apagan y se encienden las líneas 2 - 4 - 7 - 9 durante 6 segundos, al cumplirse el tiempo se apagan estas líneas y se enciende la 1 - 5 - 8 - 10, permanecen en este estado durante 6 segundos para luego apagarse y encender las líneas de bombillos 3 - 6 - 7 - 9, los cuales permanecen de igual manera 6 segundos, y luego de estos, se apagan para que se enciendan las líneas 1 - 2 - 4 - 5, y finalmente a los 6 segundos de accionamiento de estas líneas se termina el ciclo de funcionamiento, en este punto el microcontrolador, le suma a su contador de iteraciones un +1, compara con el valor específico calculado de ciclos, y si su contador aún permanece menor o igual, repite la secuencia una vez más hasta completar el número de veces calculadas para el día y apagar el banco de pruebas.

Ilustración 41 - Ciclo de accionamiento bombillos incandescentes





Arduino, en el cual se pueden realizar cualquier tipo de programaciones de simulación.

Ilustración 44 - Banco De pruebas en Funcionamiento



El banco está equipado con mecanismos de protección para apagado inmediato en caso de emergencia o para descargas de corriente inusuales en el sistema.

El equipo cuenta con protecciones de todo tipo para desempeñar una experimentación segura y acorde con las condiciones simuladas de trabajo.

Entre los sistemas de seguridad se encuentran la utilización de multinueves o breakers para protección de las líneas de bombillos a sobre corrientes.

También se posee un contactor y breaker principal que se encuentra antes de la fuente de poder, el cual se conecta directamente con un botón

de paro de emergencia para cualquier tipo de eventualidad que sugiera el corte de corriente inmediato.

Ilustración 45 - Aislamiento y señalización banco de pruebas



Por otro lado también se instalaron tapas con avisos de seguridad para proteger tanto al público cercano como para emular el trabajo del bombillo un ambiente más controlado y aislado.

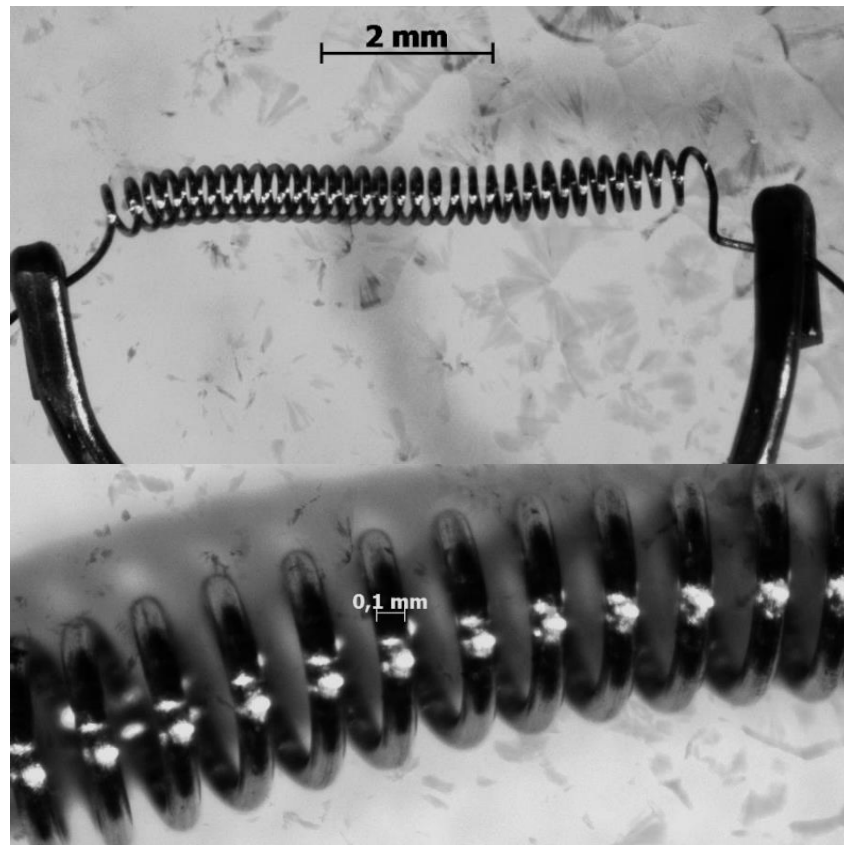
### 3.4 EXPEDIENTE DE FALLAS DE BOMBILLOS DURANTE LA EXPERIMENTACIÓN

Esta sección tiene como objetivo mostrar las fallas que se presentan físicamente en los componentes de la experimentación. A continuación se muestran las imágenes que se recopilan a través del experimento y los gráficos que reconstruyen el deterioro a medida que pasa el tiempo.

#### 3.4.1 Expediente de fallas bombillos de filamento

Con la intención de mostrar los cambios físicos y el lugar donde se produce el fallo en los bombillos incandescentes, se toman imágenes con microscopio donde se muestra la apariencia, espesor y demás características del filamento nuevo en perfecto estado. A continuación se muestran estas imágenes.

Ilustración 46 - Filamento nuevo bombillo incandescente

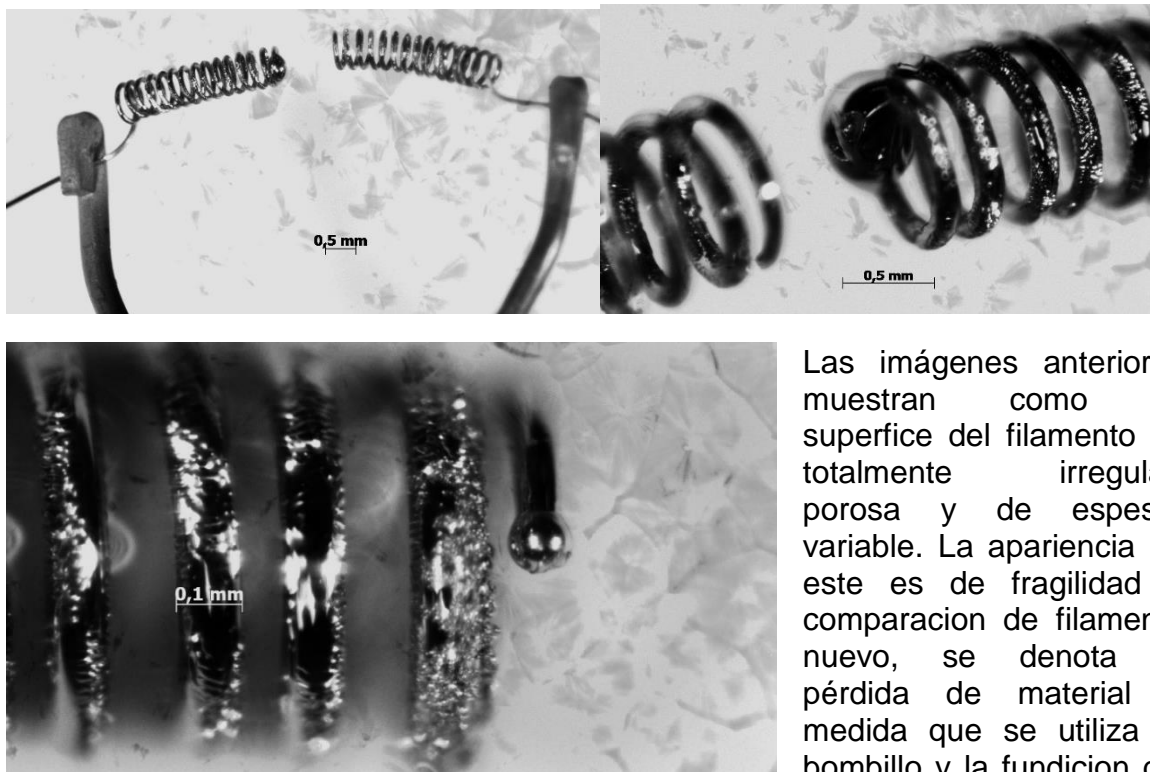


En las imágenes se aprecia el perfecto acabado y superficie del filamento, sin ningún tipo de impureza, deformación o porosidad. En cuanto a su geometría, la hélice o espiral es perfectamente simétrica a pesar de su curvatura no presenta diferencia de grosor a través de su recorrido y se aprecia la homogeneidad del material.

El único modo o mecanismo de falla que surge durante la investigación en bombillos de filamento es la rotura del mismo. Esta rotura puede presentarse por diversos factores o por una combinación de estos, lo que ocasiona el debilitamiento y posterior rotura del filamento. Los factores y fenómenos que propician la rotura de este elemento son diversos y pueden coincidir para una falla prematura de uno de los bombillos, pero esto ocurre en pocas ocasiones.

En la investigación se realiza un seguimiento diario a los bombillos, en los cuales se identifica que el filamento en particular es el componente del bombillo que comienza a deteriorarse de manera continua a medida que se le da uso, en las siguientes imágenes se aprecia el estado del filamento luego de fallar.

Ilustración 47 - Filamento dañado bombillo incandescente



Las imágenes anteriores muestran como la superficie del filamento es totalmente irregular, porosa y de espesor variable. La apariencia de este es de fragilidad a comparación de filamento nuevo, se denota la pérdida de material a medida que se utiliza el bombillo y la fundición del

material en el punto exacto de rotura, donde se presenta el máximo punto de tensión y temperatura, que produce la rotura y fundición de las puntas.

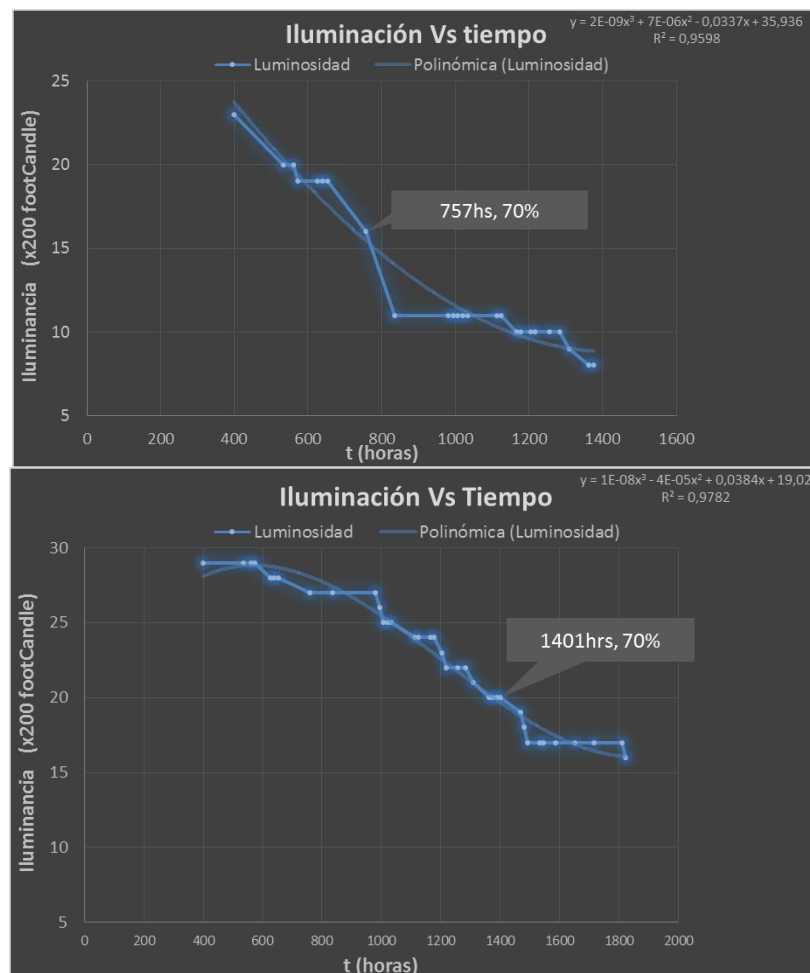
El rendimiento luminoso de una lámpara de incandescencia están delimitados por el ennegrecimiento de la ampolla, que se produce por el fenómeno de evaporación de las partículas de tungsteno que se desprenden del filamento y se ubican en el vidrio del bombillo dificultando el paso del flujo luminoso, a la vez que el grosor del filamento se disminuye y por consiguiente se debilita, hasta el punto que la mínima variación de voltaje o simplemente en un siguiente encendido el filamento ya no podrá resistir la tensión y transmitir el flujo de corriente y se romperá.

### 3.4.2 Expediente de fallas bombillos LED

En secciones anteriores se explica como un LED no falla rotundamente, sino que estos a medida que se utilizan pierden paulatinamente su luminosidad, hasta que el flujo luminoso desaparesca por completo, sin embargo, en ningun caso se espera hasta este punto, ya que a partir de un rango de luminosidad, ya la intensidad luminica es insuficiente para el espacio de trabajo o la funcion que se requiere, por este motivo se habla de que normalmente se da de baja a un bombillo LED cuando este ya llega a menos de un 70% de su capacidad luminica.

Este parametro se tomo como base para la investigacion, donde se midio la intensidad luminica de cada bombillo al inicio y basada en esta, se define el valor en cual el bombillo posee menos de un 70% su luminosidad, para tomarlo como bombillo inservible o en falla. A continuacion se muestran dos graficos donde se ilustra la pérdida continua de luminiscencia a medida que transcurren las horas de trabajo para dos LED de la muestra total.

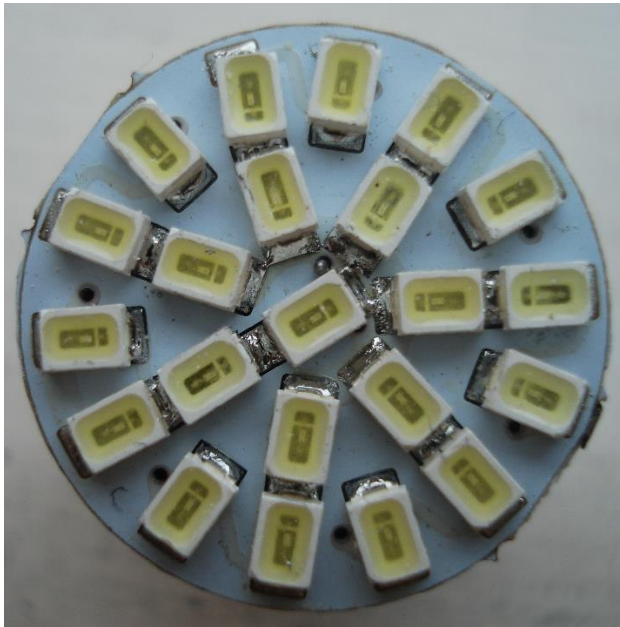
Ilustración 48 - Pérdida de Luminiscencia Bombillo LED





Por otro lado, durante la investigación se encontró una falla de fabricación en el tipo de bombillo led que se prueba, este bombillo LED cuenta con 22 LED pequeños, instalados en una tarjeta de circuito impreso de geometría redonda y pequeña, este tipo en particular, por su gran cantidad de LED emite un muy buen flujo luminoso, aparte de su pequeño tamaño, lo que los hace un producto atractivo en el mercado (ver ilustración 54).

Ilustración 49 - Bombillo LED nuevo

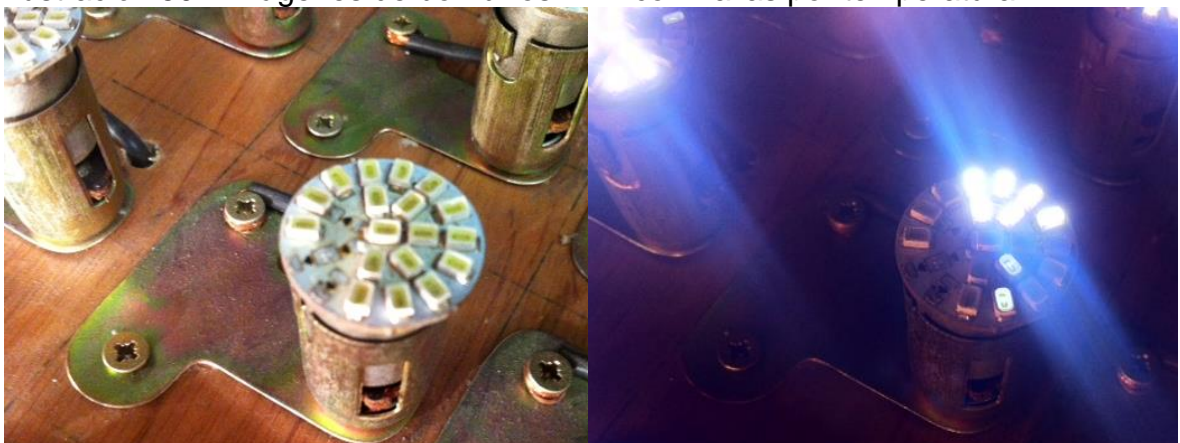


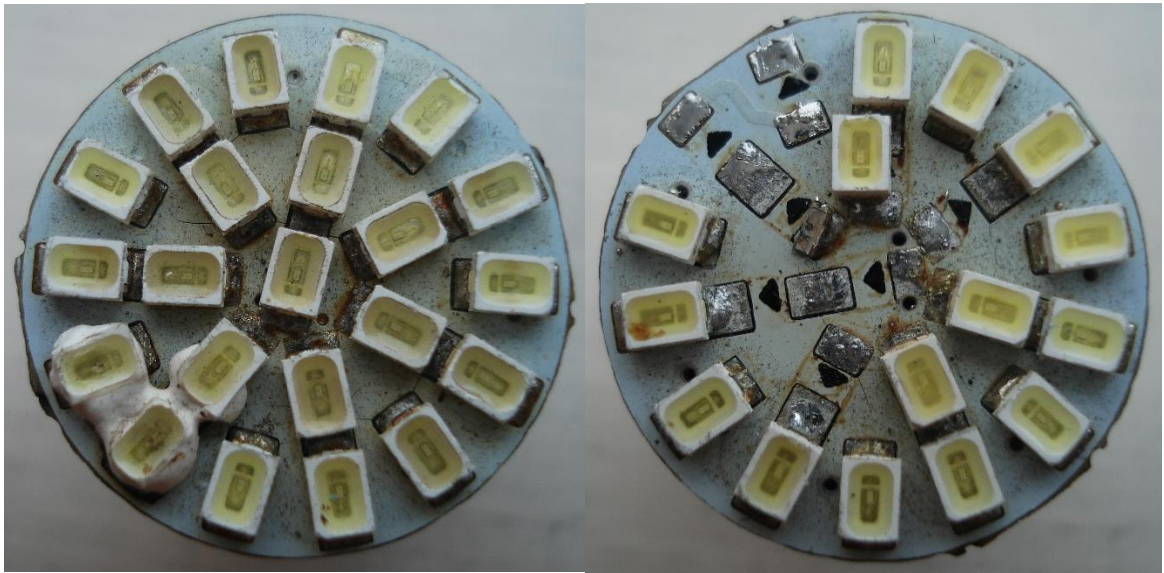
Sin embargo, algunas de sus características juegan en su contra, en específico su tamaño y posicionamiento de los LED. El tamaño reducido y la cercanía entre los diferentes LEDs, produce que luego de un tiempo de trabajo continuo, la temperatura en la superficie de la tarjeta alcanza tal punto que comienza a derretir los pequeños contactos de unión entre la tarjeta y los LEDs, instalados, lo que con el pasar del tiempo, comienza a aseverarse y a volverse cada vez más débil, lo cual produce una mala conexión, desconexión y hasta desprendimiento de los LEDs de la tarjeta, por lo que el bombillo no

pierde su intensidad directamente por el desgaste del LED, sino también por la mala conexión o el desprendimiento de los mismos de la superficie de ensamble.

A continuación se muestran las imágenes que prueban el fenómeno que se expone anteriormente.

Ilustración 50 - Imágenes de bombillos LED con Fallas por temperatura





### 3.5 CONCLUSIONES DE CAPÍTULO

Esta parte del proyecto, deja constancia del diseño del banco de pruebas necesario para la investigación y de todas las diferentes partes que integran y trabajan en conjunto para poder lograr la mejor simulación posible.

Deja descritos los principios técnicos y físicos de funcionamiento de todos los componentes implícitos en el montaje, así como el funcionamiento del control automático, desde sus partes, hasta el algoritmo y secuencia lógica que se sigue en la simulación.

Finalmente concluye con la descripción de las fallas que se presentan a través de todo el proceso investigativo, datando e ilustrando los diferentes fenómenos y la forma de fallo de los dos tipos de bombillos bajo estudio.



## 4 ANÁLISIS

### 4.1 OBJETIVO DE CAPITULO 4

Determinar la distribución que más se ajuste al comportamiento de los de los bombillos del proyecto de investigación bombillos fase tres de la curva de Davies GEMI 2013.

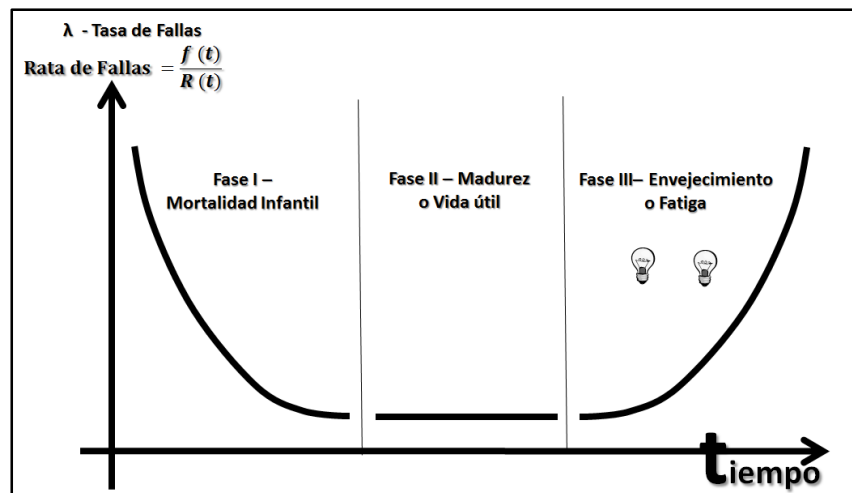
### 4.2 INTRODUCCION CAPITULO 4

El capítulo pretende demostrar matemática y estadísticamente que el comportamiento de la rata de fallas en los bombillos de frenado, pertenece y se asemeja a la Fase III de la Curva de la Bañera donde  $F(t)$  acumulada tiende a crecer por envejecimiento o desgaste, especifica en la zona 3 de la Fase III de la Curva de Davies, para ello, se hace principalmente dos tipos de análisis: primero validez estadística de la muestra seleccionada y de los bombillos en estado de falla hasta la fecha y luego como segunda prueba se realiza un análisis de confiabilidad de los resultados que se obtienen con tres programas informáticos (BaseCMD (EAGFIT), ReliaSoft Weibull ++ Versión 6 y Statgraphics Centurión XV (Versión 15.1.02); con los estudios conjugados de los tres paquetes se logra demostrar que la vida útil de los bombillos de frenado automotriz tienden a comportarse como la Zona 3 de las Fase III de la Curva de Davies.

### 4.3 DESARROLLO

El comportamiento en general de los equipos o plantas industriales, en cuanto su forma de fallar, se representa por la Curva de la Bañera, en la cual se observan claramente tres Fases, acorde al comportamiento del valor del  $\lambda$ : a la izquierda mortalidad infantil, en el centro madurez o vida útil y a la derecha fallas por desgaste, envejecimiento o alta fatiga.

Ilustración 51 - Curva tipificada de Davies



El fin del capítulo es mostrar si efectivamente o no, los bombillos de frenado en su vida de funcionamiento terminan en la Fase III derecha de Davies.

#### 4.3.1 Validez estadística

Los resultados hasta la fecha después de muchos meses de experimentación y funcionamiento permanente de los bombillos de frenado, simulados en sus ciclos reales de fatiga al rodar en carreteras, muestra los siguientes valores de tiempo de vida, tanto en los incandescentes (tradicionales) y en los LED.

Ilustración 52 - Bombillos Incandescentes y LED s en estado de falla

INCANDESCENTES				LED s			
Número	Identificación en el Banco de Prueba		Vida útil en horas	Número	Identificación en el Banco de Prueba		Vida útil en horas
	Zona	Letra			Zona	Letra	
1	5	H	85.43	1	5	J	540.40
2	1	C	230.00	2	4	C	658.69
3	2	D	230.00	3	4	D	757.43
4	2	J	230.00	4	4	E	759.03
5	3	D	230.00	5	4	F	760.63
6	3	F	230.00	6	5	B	762.23
7	3	G	230.00	7	5	D	803.26
8	3	H	230.00	8	5	E	804.86
9	3	I	230.00	9	5	F	806.46
10	9	A	230.00	10	6	B	808.06
11	9	J	230.00	11	6	D	809.66
12	10	I	230.00	12	6	H	811.26
13	9	B	239.20	13	3	F	852.29
14	2	H	239.20	14	4	G	853.89
15	2	G	248.40	15	4	I	855.49
16	3	A	248.40	16	4	J	857.09
17	4	F	248.40	17	5	A	858.69
18	8	J	248.40	18	5	G	860.29
19	9	C	248.40	19	5	I	875.03
20	9	D	248.40	20	6	A	876.63
21	9	E	248.40	21	6	C	878.23
22	9	F	248.40	22	6	E	879.83
23	9	G	248.40	23	6	F	881.43
24	9	H	248.40	24	6	G	883.03
25	10	H	266.80	25	7	E	924.06
26	1	E	276.00	26	7	G	925.66
27	1	I	276.00	27	7	H	927.26
28	6	B	276.00	28	7	I	928.86
29	9	I	276.00	29	8	C	930.46
30	10	G	276.00	30	8	G	932.06
31	10	F	285.20	31	8	I	973.09
32	5	B	285.20	32	9	B	974.69
33	2	E	285.20	33	9	D	976.29
34	2	I	285.20	34	9	I	977.89
35	4	J	285.20	35	10	D	979.49
36	1	A	303.60	36	1	E	1033.66

INCANDESCENTES				LED S			
Número	Identificación en el Banco de Prueba		Vida útil en horas	Número	Identificación en el Banco de Prueba		Vida útil en horas
	Zona	Letra			Zona	Letra	
37	1	F	303.60	37	1	F	1035.26
38	1	J	303.60	38	1	G	1036.86
39	8	I	303.60	39	2	F	1038.46
40	10	A	303.60	40	2	G	1040.06
41	10	B	312.80	41	4	B	1043.26
42	10	E	312.80	42	4	H	1044.86
43	1	D	312.80	43	5	C	1046.46
44	2	A	312.80	44	5	H	1048.06
45	4	G	322.00	45	6	I	1049.66
46	4	H	322.00	46	6	J	1051.26
47	5	D	322.00	47	8	F	1052.86
48	4	E	322.00	48	9	E	1054.46
49	4	I	322.00	49	9	F	1070.80
50	8	E	322.00	50	9	H	1072.40
51	10	J	322.00	51	4	A	1087.14
52	1	B	322.00	52	9	J	1088.74
53	1	G	322.00	53	8	B	1105.09
54	2	C	322.00	54	9	A	1103.49
55	3	C	349.60	55	7	J	1119.83
56	3	E	349.60	56	9	C	1201.89
57	3	J	349.60	57	10	B	1203.49
58	4	B	349.60	58	2	E	1218.23
59	5	C	349.60	59	3	G	1219.83
60	6	C	349.60	60	3	J	1221.43
61	10	D	349.60	61	9	G	1223.03
62	4	C	349.60	62	1	H	1264.06
63	4	D	349.60	63	7	B	1278.80
64	5	A	349.60	64	1	D	1306.69
65	6	I	358.80	65	1	I	1308.29
66	7	J	358.80	66	1	J	1309.89
67	8	C	358.80	67	2	D	1311.49
68	5	G	358.80	68	3	D	1313.09
69	6	G	358.80	69	7	C	1314.69
70	8	B	358.80	70	7	D	1316.29
71	1	H	358.80	71	7	F	1317.89
72	2	B	358.80	72	2	H	1332.63
73	2	F	358.80	73	8	A	1334.23
74	5	E	368.00	74	8	D	1335.83
75	5	J	368.00	75	8	H	1337.43
76	6	J	368.00	76	10	A	1339.03
77	7	D	368.00	77	2	I	1380.06
78	7	G	368.00	78	2	J	1381.66
79	8	D	368.00	79	3	H	1383.26
80	8	G	368.00	80	10	H	1263.26
81	3	B	386.40	81	10	E	1412.74
82	4	A	404.80	82	10	G	1414.34
83	5	F	294.40	83	3	B	1442.23
84	6	D	294.40	84	10	J	1496.40
85	7	B	294.40	85	10	C	1537.43
86	7	I	294.40	86	2	C	1604.74

INCANDESCENTES				LED s			
Número	Identificación en el Banco de Prueba		Vida útil en horas	Número	Identificación en el Banco de Prueba		Vida útil en horas
	Zona	Letra			Zona	Letra	
87	8	F	294.40	87	3	E	1606.34
88	8	H	294.40	88	10	I	1621.09
89	10	C	294.40	89	1	A	1635.83
90	5	I	331.20	90	3	C	1637.43
91	6	F	331.20	91	2	B	1691.60
92	6	H	331.20	92	2	A	1732.63
93	7	A	331.20	93	10	F	1734.23
94	7	C	331.20	94	3	A	1801.54
95	7	E	331.20	95			
96	8	A	340.40	96			
97	7	F	340.40	97			
98	7	H	340.40	98			
99	6	A	377.20	99			
100	6	E	377.20	100			

Promedio	302.65
Desviación	52.420849
Mediana	177.54

Promedio	1127.14
Desviación	275.71149
Mediana	701.43

Ilustración 53 - Segundo ciclo de los incandescentes

INCANDESCENTES - Segundo ciclo			
Número	Identificación en el Banco de Prueba		Vida útil en horas
	Zona	Letra	
1	7	A	79.33
2	7	B	85.67
3	6	I	94.67
4	10	E	94.67
5	10	F	94.67
6	2	G	110.00
7	9	C	125.33
8	1	C	133.00
9	1	D	140.67
10	2	B	140.67
11	9	G	140.67
12	5	E	156.00
13	5	J	156.00
14	6	G	156.00
15	4	B	171.33
16	3	F	179.00
17	4	A	186.67
18	3	E	209.67
			Promedio 136.33
			Desviación 37.5917179
			Mediana 86.96

Ilustración 54 - Incandescentes Ciclo 1 de 100 más ciclo 2 a la fecha - Fallidas

INCANDESCENTES - TODO Primero y Segundo ciclo			
Número	Identificación en el Banco de Prueba		Vida útil en horas
	Zona	Letra	
1	7	A	79.33
2	5	H	85.43
3	7	B	85.67
4	6	I	94.67
5	10	E	94.67
6	10	F	94.67
7	2	G	110.00
8	9	C	125.33
9	1	C	133.00
10	1	D	140.67
11	2	B	140.67
12	9	G	140.67
13	5	E	156.00
14	5	J	156.00
15	6	G	156.00
16	4	B	171.33
17	3	F	179.00
18	4	A	186.67
19	3	E	209.67
20	1	C	230.00
21	2	D	230.00
22	2	J	230.00
23	3	D	230.00
24	3	F	230.00
25	3	G	230.00
26	3	H	230.00
27	3	I	230.00
28	9	A	230.00
29	9	J	230.00
30	10	I	230.00
31	9	B	239.20
32	2	H	239.20
33	2	G	248.40
34	3	A	248.40
35	4	F	248.40
36	8	J	248.40
37	9	C	248.40
38	9	D	248.40
39	9	E	248.40
40	9	F	248.40

INCANDESCENTES - TODO Primero y Segundo ciclo			
Número	Identificación en el Banco de Prueba		Vida útil en horas
	Zona	Letra	
42	9	H	248.40
43	10	H	266.80
44	1	E	276.00
45	1	I	276.00
46	6	B	276.00
47	9	I	276.00
48	10	G	276.00
49	10	F	285.20
50	5	B	285.20
51	2	E	285.20
52	2	I	285.20
53	4	J	285.20
54	1	A	294.40
55	1	F	294.40
56	1	J	294.40
57	8	I	294.40
58	10	A	294.40
59	10	B	294.40
60	10	E	294.40
61	1	D	303.60
62	2	A	303.60
63	4	G	303.60
64	4	H	303.60
65	5	D	303.60
66	4	E	312.80
67	4	I	312.80
68	8	E	312.80
69	10	J	312.80
70	1	B	322.00
71	1	G	322.00
72	2	C	322.00
73	3	C	322.00
74	3	E	322.00
75	3	J	322.00
76	4	B	322.00
77	5	C	322.00
78	6	C	322.00
79	10	D	322.00
80	4	C	331.20
81	4	D	331.20

INCANDESCENTES - TODO Primero y Segundo ciclo			
Número	Identificación en el Banco de Prueba		Vida útil en horas
	Zona	Letra	
83	6	I	331.20
84	7	J	331.20
85	8	C	331.20
86	5	G	340.40
87	6	G	340.40
88	8	B	340.40
89	1	H	349.60
90	2	B	349.60
91	2	F	349.60
92	5	E	349.60
93	5	J	349.60
94	6	J	349.60
95	7	D	349.60
96	7	G	349.60
97	8	D	349.60
98	8	G	349.60
99	3	B	358.80
100	4	A	358.80
101	5	F	358.80
102	6	D	358.80
103	7	B	358.80
104	7	I	358.80
105	8	F	358.80
106	8	H	358.80
107	10	C	358.80
108	5	I	368.00
109	6	F	368.00
110	6	H	368.00
111	7	A	368.00
112	7	C	368.00
113	7	E	368.00
114	8	A	368.00
115	7	F	377.20
116	7	H	377.20
117	6	A	386.40
118	6	E	404.80

Promedio	357.27
Desviación	15.32
Mediana	358.80

### Ilustración 55 - Estadística Básica Incandescentes Ciclo 1 -Todo Ciclo 1, 2 y LED s

Software DYANE		
Variable 2: Incandescentes	Variable 3: Dos ciclos Incandescentes	Variable 1: LED
Nº de casos: 100	Nº de casos: 118	Nº de casos: 94
Suma: 30,554.8000	Suma: 33,009.8500	Suma: 105,945.0000
Máximo: 405.0000	Máximo: 404.8000	Máximo: 1,802.0000
Mínimo: 85.0000	Mínimo: 79.3300	Mínimo: 540.0000
Rango: 320.0000	Rango: 325.4700	Rango: 1,262.0000
Media aritmética: 305.5480	Media aritmética: 279.7445	Media aritmética: 1,127.0745
Mediana: 313.0000	Mediana: 294.4000	Mediana: 1,053.5000
Moda: 230.0000	Moda: 230.0000	Moda: 540.0000
Varianza: 2,721.8357	Varianza: 6,201.4635	Varianza: 75,222.4732
Desviación estándar: 52.1712	Desviación estándar: 78.7494	Desviación estándar: 274.2672

El tamaño muestral se determina a partir del método clásico para muestras finita e infinita, al igual para variables cualitativas y cuantitativas (Santesmases, 2003), para ello se realiza el cálculo en Excel, así.

### Ilustración 56 - Tamaño muestral con Ciclo 1, Ciclo 2 Incandescentes y LED

1	85.43	Resultados de la muestra		Proporcional	Numérica 1
2	230.00	Ítem muestral	Elementos al azar (#)	Vida útil	Vida útil
3	230.00	1	74	368.0	368.0
4	230.00	2	34	285.2	285.2
5	230.00	3	39	230.0	230.0
6	230.00	4	71	230.0	230.0
7	230.00	5	37	230.0	230.0
8	230.00	6	20	230.0	230.0
9	230.00	7	94	230.0	230.0
10	230.00	8	76	230.0	230.0
11	230.00	9	8	230.0	230.0
12	230.00	10	17	230.0	230.0
13	239.20	11	36	230.0	230.0
14	239.20	12	9	230.0	230.0
15	248.40	13	23	239.2	239.2
16	248.40	14	84	239.2	239.2
17	248.40	15	49	248.4	248.4
18	248.40	16	72	248.4	248.4
19	248.40	17	14	248.4	248.4
20	248.40	18	6	248.4	248.4
21	248.40	19	57	248.4	248.4
22	248.40	20	50	248.4	248.4
23	248.40	21	38	248.4	248.4
24	248.40	22	30	248.4	248.4
25	266.80	23	31	248.4	248.4
26	276.00	24	19	248.4	248.4
27	276.00	25	5	266.8	266.8
28	276.00	26	57	276	276.0
29	276.00	27	97	276	276.0
30	276.00	28	51	276	276.0
31	285.20	29	63	276	276.0
32	285.20	30	19	276	276.0
33	285.20	31	88	285.2	285.2
34	285.20				
35	285.20	Cálculos para la determinación muestral de tamaño n de la prueba final			

35	285.20	Cálculos para la determinación muestral de tamaño n de la prueba final			
36	303.60	Media	0.0323	253.1484	
37	303.60				
38	303.60	Desviación estándar $\sigma$ de la muestra	0.180	28.294	
39	303.60				
40	303.60	Proporción positiva	1.14%		
41	312.80	Proporción negativa	100.00%		
42	312.80				
43	312.80	Población o Universo	100	Población o Universo	100
44	312.80	Error de precisión máximo deseado	1%	1%	
45	322.00	Rango de error permisible más o menos		5.063	
46	322.00			253.15 más o menos 5.06	
47	322.00	Probabilidad (distribución normal)	95%	99%	
48	322.00	Nivel Z deseado	1.6449	2.3263	
49	322.00	n con población infinita	307	169	
50	322.00	Validación de si n es igual o mayor al 5%	No cumple la n de infinita	No cumple la n de infinita	
51	322.00				
52	322.00	n con población finita	75	63	
53	322.00				
54	322.00	n final estimada	Proporciones	Valores	
55	349.60		Se toma finita con n igual a	Se toma finita con n igual a	
56	349.60		75	63	
57	349.60				
58	349.60				
59	349.60				
60	349.60				
61	349.60				
62	349.60				
63	349.60				
		En este caso particular se toma la n mayor de las dos características			75

Para el Ciclo combinado 1 y 2 Incandescentes se tiene

Cálculos para la determinación muestral de tamaño n de la prueba final					
Media	0.0000	171.2461			
Desviación estándar $\sigma$ de la muestra	0.000	56.544			
Proporción positiva	0.00%				
Proporción negativa	100.00%				
Población o Universo	100	Población o Universo	100		
Error de precisión máximo deseado	1%	1%			
Rango de error permisible más o menos		3.425			
		171.25 más o menos 3.42			
Probabilidad (distribución normal)	95%	99%			
Nivel Z deseado	1.6449	2.3263			
n con población infinita	0	1475			
Validación de si n es igual o mayor al 5%	Cumple la n de infinita	No cumple la n de infinita			
n con población finita	0	94			
n final estimada	Proporciones	Valores			
	Se toma infinita con n igual a	Se toma finita con n igual a			
	0	94			
En este caso particular se toma la n mayor de las dos características			94		

## Para los LED

Número	Vida Útil	LED			Media es igual 1127.14	
1	540.40	Resultados de la muestra			Proporcional	Numerica 1
2	658.69	Ítem muestral	Elementos al azar (#)	Vida útil	Encima de la media 1 por debajo 0	Vida útil
3	757.43	1	79	540	1	540.4
4	759.03	2	42	659	1	658.7
5	760.63	3	47	757	1	757.4
6	762.23	4	52	759	1	759.0
7	803.26	5	86	761	1	760.6
8	804.86	6	8	762	1	762.2
9	806.46	7	70	803	1	803.3
10	808.06	8	7	805	1	804.9
11	809.66	9	25	806	1	806.5
12	811.26	10	85	808	1	808.1
13	852.29	11	87	810	1	809.7
14	853.89	12	63	811	1	811.3
15	855.49	13	16	852	1	852.3
16	857.09	14	14	854	1	853.9
17	858.69	15	93	855	1	855.5
18	860.29	16	37	857	1	857.1
19	875.03	17	5	859	1	858.7
20	876.63	18	92	860	1	860.3
21	878.23	19	72	875	1	875.0
22	879.83	20	4	877	1	876.6
23	881.43	21	5	878	1	878.2
24	883.03	22	37	880	1	879.8
25	924.06	23	8	881	1	881.4
26	925.66	24	8	883	1	883.0
27	927.26	25	68	924	1	924.1
28	928.86	26	32	926	1	925.7
29	930.46	27	14	927	1	927.3
30	932.06	28	31	929	1	928.9
31	973.09	29	30	930	1	930.5
32	974.69	30	76	932	1	932.1
33	976.29	31	82	973	1	973.1
34	977.89					
35	979.49					
36	1033.66					
37	1035.26					
38	1036.86					
39	1038.46					
40	1040.06					
41	1043.26					
42	1044.86					
43	1046.46					
44	1048.06					
45	1049.66					
46	1051.26					
47	1052.86					
48	1054.46					
49	1070.80					
50	1072.40					
51	1087.14					
52	1088.74					
53	1105.09					
54	1103.49					
55	1119.83					
56	1201.89					
57	1203.49					
58	1218.23					
59	1219.83					
60	1221.43					
61	1223.03					
62	1264.06					

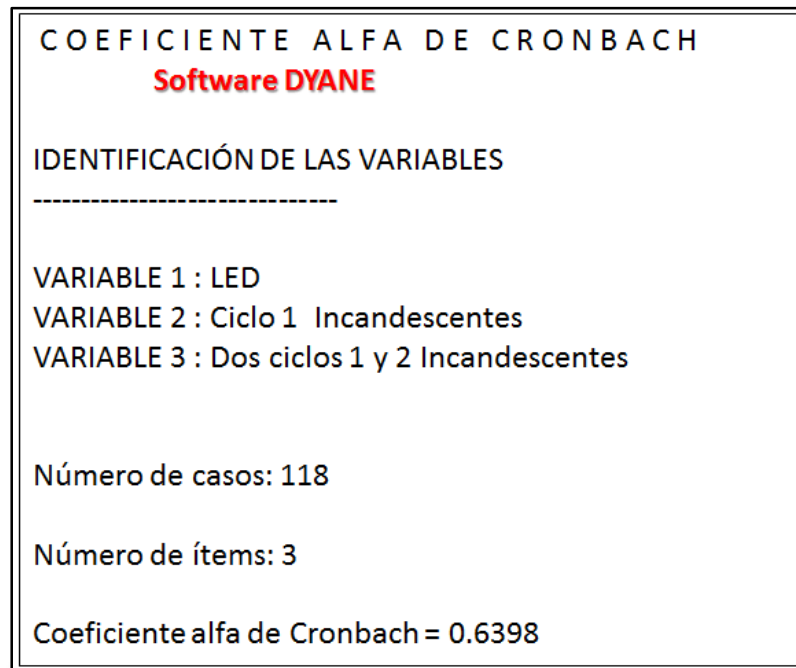
  

Cálculos para la determinación muestral de tamaño n de la prueba final			
Media		1.0000	839.8470
Desviación estándar $\sigma$ de la muestra		0.000	87.547
Proporción positiva		100.00%	
Proporción negativa		3.23%	
Población o Universo		100	Población o Universo 100
Error de precisión máximo deseado		1%	1%
Rango de error permisible más o menos			16.797
			839.85 más o menos 16
Probabilidad (distribución normal)		95%	99%
Nivel Z deseado		1.6449	2.3263
n con población infinita		873	147
Validación de si n es igual o mayor al 5%		No cumple la n de infinita	No cumple la n de infinita
n con población finita		90	60
n final estimada	Proporciones		Valores
	Se toma finita con n igual a		Se toma finita con n
	90		60
En este caso particular se toma la n mayor de las dos características			90

En los tres casos, la Muestra más alta es de 94, al momento ya se cumple con suficiencia en Incandescentes y LED. "por lo tanto se puede proceder a hacer el análisis, con el tamaño muestral que hasta ahora se tiene. Para consolidar este análisis de datos previos, se recurre a DYANE para realizar la prueba de Coeficiente Alfa de Cronbach, el cual da aceptable y se puede proseguir con el Análisis por Distribuciones de confiabilidad, objeto del capítulo.

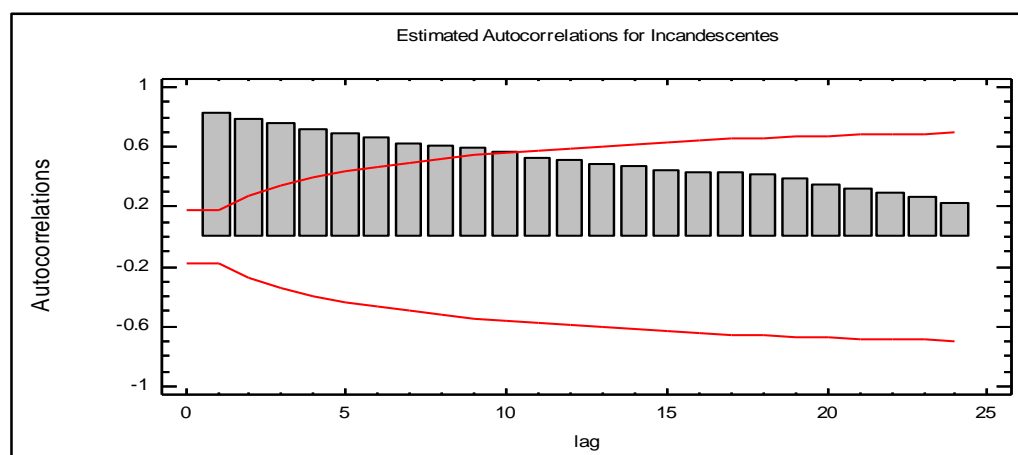


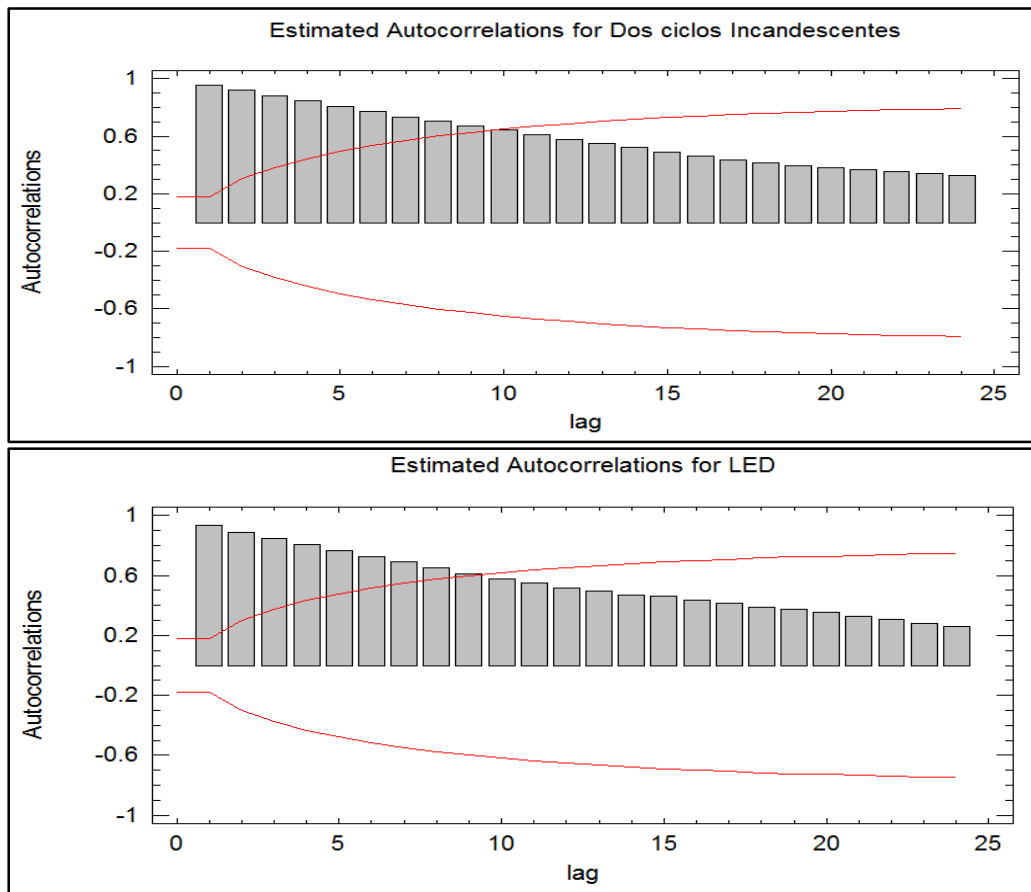
Ilustración 57 - Prueba Coeficiente Cronbach a las tres muestras Ciclo 1 – 2 y LED



Ahora para comprobar que las fallas del bombillo de freno, no es aleatoria y que se encuentra en una zona diferente a la 2 de Davies, donde el comportamiento es aleatorio y no está en función del tiempo, se realiza a las tres (3) poblaciones, la prueba estocástica de Función de Auto Correlación - ACF con Statgraphics, donde muestra:

Ilustración 58 - Pruebas ACF tres muestras





En los tres casos, los primeros palotes sobresalen significativamente fuera de la banda de confianza y se puede aseverar que cumplen el ACF.

Se verifica entonces, que las tres pruebas, cumplen el ACF, lo que expresa contundentemente que los datos no son aleatorios, no están en Fase II Davies, se correlacionan entre sí, tienen pendiente activa, etcétera, o sea en conclusión se puede analizar y concluir estadísticamente observaciones de las poblaciones tomadas.

#### 4.3.2 Análisis de resultados iniciales

El comportamiento inicial de los primeros fallos del ciclo 1, se analizan con los tres programas y arrojan con varias funciones, los resultados que se esbozan a continuación.

##### 4.3.2.1 *Estudio de los bombillos incandescentes de Lote Inicial Ciclo 1 con Weibull del Programa Base CMD & CMD Múltiple*

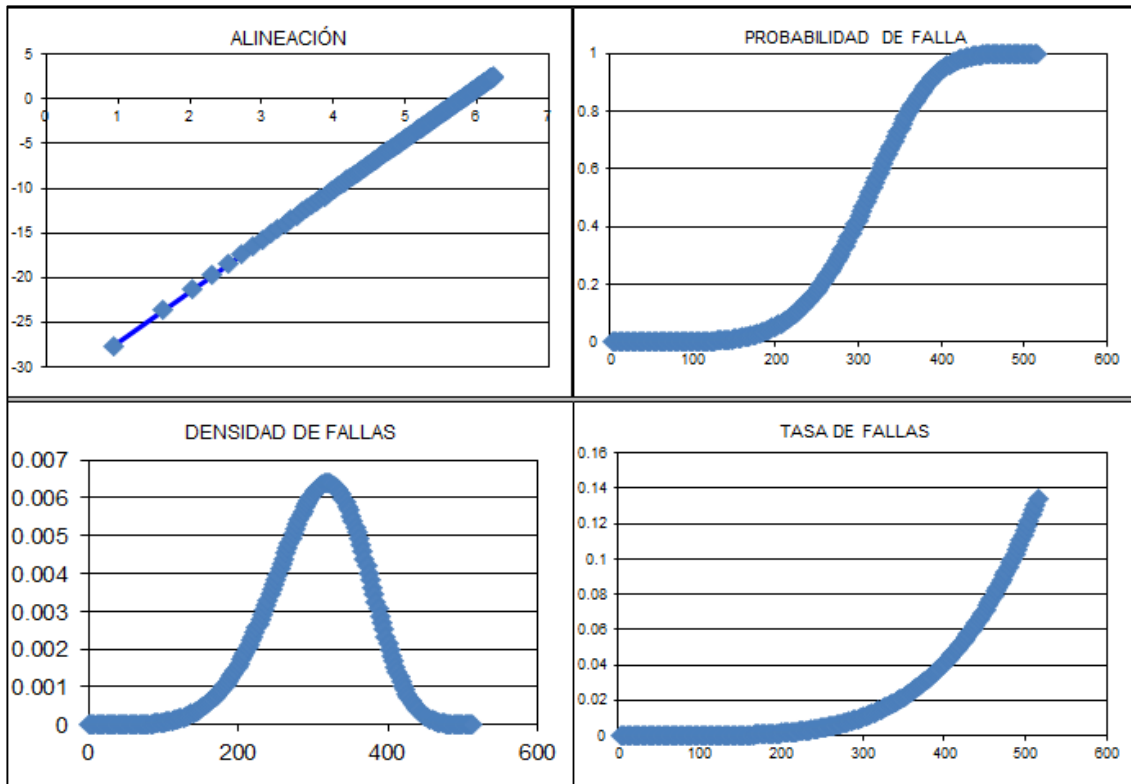
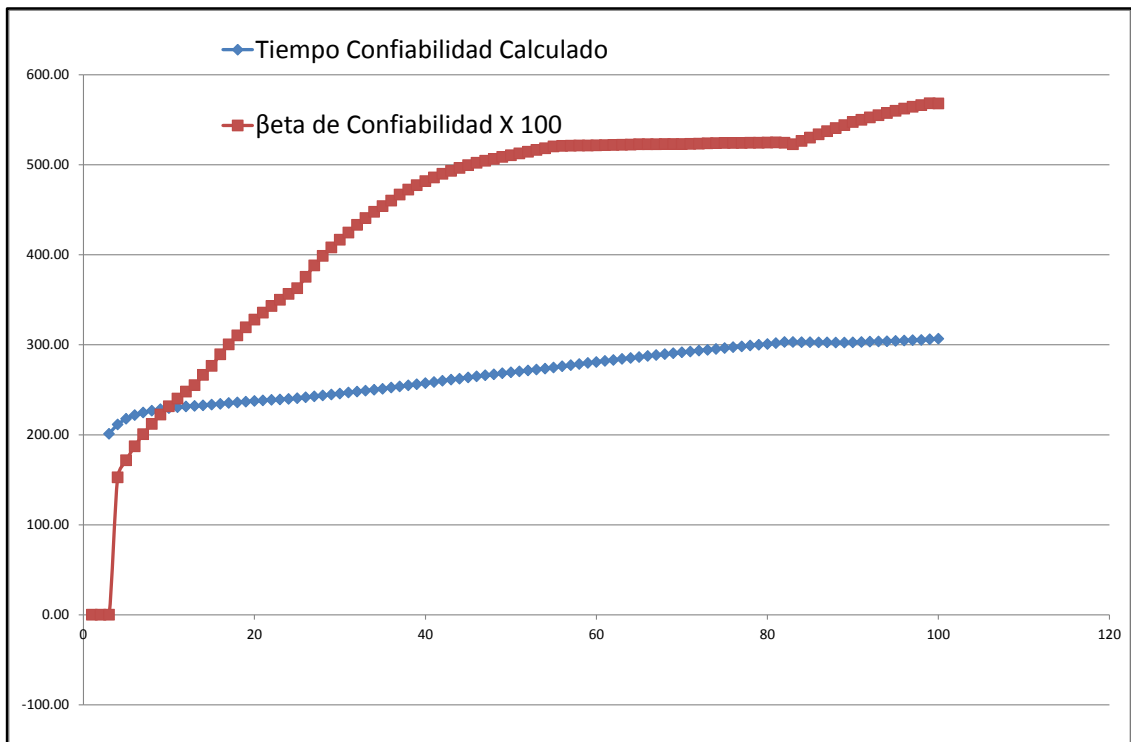
Cuando se aplica el programa conjunto de los paquetes BaseCMD y CMDMúltiple, muestra el comportamiento que se detalla a continuación con Weibull de los bombillos de filamento Ciclo 1.

## Ilustración 59 - Comportamiento Bombillos Ciclo 1 Weibull y Ajuste K-S<sup>2</sup> y A-D

Dato Número	Tiempo	Parámetro 1	Parámetro 2	Tiempo Confiabilidad Calculado $MTBM_c$ o $MTBM_p$	$\beta$ de Confiabilidad X 100	Bondades de Ajuste - Kolmogorov - Smirnov			Bondades de Ajuste - Anderson & Darling		
		$\beta$ de Confiabilidad	$\eta$ - Eta			Valor Prueba Real	Valor Crítico	Cumple o No	Valor Prueba Real	Valor Crítico	Cumple o No
1	85.4286				0						
2	230.0000				0						
3	230.0000	1.528	223.236	201.10	152.7667839	0.1452	0.64	Cumple	0.459876205	0.637	Cumple
4	230.0000	1.717	237.173	211.48	171.6658646	0.2282	0.56	Cumple	0.734084097	0.637	No Cumple
5	230.0000	1.872	245.222	217.71	187.2442524	0.2823	0.51	Cumple	1.044967013	0.637	No Cumple
6	230.0000	2.005	250.295	221.81	200.5300212	0.3206	0.47	Cumple	1.376742529	0.637	No Cumple
7	230.0000	2.121	253.687	224.68	212.1310973	0.3493	0.44	Cumple	1.722016792	0.637	No Cumple
8	230.0000	2.224	256.053	226.78	222.4384953	0.3716	0.41	Cumple	2.076733005	0.637	No Cumple
9	230.0000	2.317	257.755	228.37	231.7193714	0.3895	0.39	No Cumple	2.438423882	0.637	No Cumple
10	230.0000	2.402	259.007	229.61	240.1647617	0.4042	0.37	No Cumple	2.80547612	0.637	No Cumple
11	230.0000	2.479	259.943	230.59	247.9162239	0.4165	0.35	No Cumple	3.176776585	0.637	No Cumple
12	230.0000	2.551	260.653	231.39	255.0817	0.4270	0.34	No Cumple	3.551524746	0.637	No Cumple
13	239.2000	2.666	261.022	232.02	266.5627492	0.4005	0.33	No Cumple	3.803059728	0.637	No Cumple
14	239.2000	2.764	261.475	232.72	276.4443258	0.4090	0.31	No Cumple	4.068514617	0.637	No Cumple
15	248.4000	2.894	261.884	233.50	289.35994	0.3785	0.30	No Cumple	4.215331459	0.637	No Cumple
16	248.4000	3.005	262.424	234.35	300.4501627	0.3856	0.30	No Cumple	4.381883701	0.637	No Cumple
17	248.4000	3.104	262.982	235.20	310.3759271	0.3925	0.29	No Cumple	4.566236098	0.637	No Cumple
18	248.4000	3.194	263.519	236.00	319.4393849	0.3989	0.28	No Cumple	4.766516701	0.637	No Cumple
19	248.4000	3.278	264.021	236.75	327.8214344	0.4049	0.27	No Cumple	4.981003249	0.637	No Cumple
20	248.4000	3.356	264.484	237.45	335.6436466	0.4105	0.26	No Cumple	5.208162463	0.637	No Cumple
21	248.4000	3.430	264.908	238.10	342.9934609	0.4157	0.26	No Cumple	5.446649911	0.637	No Cumple
22	248.4000	3.499	265.295	238.70	349.9367295	0.4206	0.25	No Cumple	5.695294061	0.637	No Cumple
23	248.4000	3.565	265.647	239.25	356.5247541	0.4252	0.25	No Cumple	5.953075628	0.637	No Cumple
24	248.4000	3.628	265.967	239.76	362.7985601	0.4295	0.24	No Cumple	6.219106937	0.637	No Cumple
25	266.8000	3.754	266.318	240.53	375.4202932	0.3378	0.24	No Cumple	6.163358155	0.637	No Cumple
26	276.0000	3.880	266.977	241.57	387.9945076	0.2941	0.24	No Cumple	5.996240091	0.637	No Cumple
27	276.0000	3.986	267.748	242.64	398.6452414	0.2979	0.23	No Cumple	5.864584698	0.637	No Cumple
28	276.0000	4.081	268.553	243.69	408.0768201	0.3023	0.23	No Cumple	5.764633017	0.637	No Cumple
29	276.0000	4.166	269.357	244.72	416.6276895	0.3068	0.22	No Cumple	5.693546484	0.637	No Cumple
30	276.0000	4.245014991	270.145612	245.6964073	424.5014991	0.31141889	0.22	No Cumple	5.648806691	0.637	No Cumple
31	285.2000	4.331185449	271.0923007	246.8438449	433.1185449	0.26543596	0.218	No Cumple	5.487805638	0.637	No Cumple
32	285.2000	4.407067837	272.0448595	247.9604921	440.7067837	0.27029081	0.216	No Cumple	5.362228592	0.637	No Cumple
33	285.2000	4.47628207	272.9761302	249.0343107	447.628207	0.27526697	0.214	No Cumple	5.267183423	0.637	No Cumple
34	285.2000	4.540510978	273.8764563	250.0624176	454.0510978	0.28025606	0.212	No Cumple	5.19941618	0.637	No Cumple
35	285.2000	4.600786551	274.7418697	251.0448085	460.0786551	0.28519822	0.21	No Cumple	5.156291399	0.637	No Cumple
36	303.6000	4.667426582	275.9821375	252.3888574	466.7426582	0.19075141	0.20333333	Cumple	4.895641101	0.637	No Cumple
37	303.6000	4.722755004	277.2256564	253.6996584	472.2755004	0.19651759	0.20056676	Cumple	4.682159246	0.637	No Cumple
38	303.6000	4.771858759	278.4393863	254.9634606	477.1858759	0.20244503	0.19791013	No Cumple	4.507049404	0.637	No Cumple
39	303.6000	4.816807256	279.6128781	256.1773509	481.6807256	0.20838866	0.19535635	No Cumple	4.365162781	0.637	No Cumple
40	303.6000	4.858741713	280.7423591	257.3415038	485.8741713	0.21427404	0.19289894	No Cumple	4.25265844	0.637	No Cumple
41	312.8000	4.897933395	282.0350953	258.6468894	489.7933395	0.17314314	0.19053199	Cumple	4.067225868	0.637	No Cumple
42	312.8000	4.932329416	283.2945146	259.9071901	493.2329416	0.17938814	0.18825009	Cumple	3.917152218	0.637	No Cumple
43	312.8000	4.964064613	284.5102208	261.1194428	496.4064613	0.18558531	0.18604826	Cumple	3.796876446	0.637	No Cumple
44	312.8000	4.994031416	285.6799602	262.2842977	499.4031416	0.19167798	0.18392192	No Cumple	3.702827023	0.637	No Cumple
45	322.0000	5.020385278	287.0036041	263.5797111	502.0385278	0.1529148	0.18186686	Cumple	3.543474514	0.637	No Cumple
46	322.0000	5.043442704	288.2906615	264.8318099	504.3442704	0.15926598	0.17987919	Cumple	3.415533579	0.637	No Cumple
47	322.0000	5.064909844	289.5334169	266.0386612	506.4909844	0.1655386	0.17795529	Cumple	3.314054447	0.637	No Cumple
48	322.0000	5.085455701	290.730629	267.2011228	508.5455701	0.17168961	0.17609183	Cumple	3.235900007	0.637	No Cumple
49	322.0000	5.105430486	291.8828967	268.3207767	510.5430486	0.17769859	0.17428571	No Cumple	3.178663161	0.637	No Cumple
50	322.0000	5.12503892	292.9915555	269.3994422	512.503892	0.18355563	0.17253405	No Cumple	3.14037829	0.637	No Cumple

<sup>2</sup> K-S Kolmogórov-Smirnov, el cual trabaja muy bien en las puntas de la cola izquierda y derecha.

Dato Número	Tiempo	Parámetro 1	Parámetro 2	Tiempo Confiabilidad		Bondades de Ajuste - Kolmogorov - Smirnov			Bondades de Ajuste - Anderson & Darling		
		βeta de Confiabilidad	η - Eta	Calculado MTBM <sub>c</sub> o MTBM <sub>p</sub>	βeta de Confiabilidad X 100	Valor Prueba Real	Valor Crítico	Cumple o No	Valor Prueba Real	Valor Crítico	Cumple o No
50	322.0000	5.12503892	292.9915555	269.3994422	512.503892	0.18355563	0.17253405	No Cumple	3.14037829	0.637	No Cumple
51	322.0000	5.144407265	294.0582611	270.438997	514.4407265	0.18925659	0.17083417	No Cumple	3.119390965	0.637	No Cumple
52	322.0000	5.163615484	295.0847969	271.4412976	516.3615484	0.19480071	0.16918356	No Cumple	3.114282896	0.637	No Cumple
53	322.0000	5.182714662	296.072976	272.4081421	518.2714662	0.20018939	0.16757989	No Cumple	3.123822573	0.637	No Cumple
54	322.0000	5.201737235	297.0245882	273.341252	520.1737235	0.20542538	0.16602097	No Cumple	3.146930175	0.637	No Cumple
55	349.6000	5.209039369	298.4591513	274.6835688	520.9039369	0.08972619	0.16450477	Cumple	2.956470888	0.637	No Cumple
56	349.6000	5.211687892	299.876436	275.9960105	521.1687892	0.09570038	0.16302936	Cumple	2.801500694	0.637	No Cumple
57	349.6000	5.212903983	301.258782	277.2719905	521.2903983	0.10172071	0.16159295	Cumple	2.674218251	0.637	No Cumple
58	349.6000	5.21378263	302.6014082	278.5104105	521.378263	0.10771112	0.16019385	Cumple	2.570447623	0.637	No Cumple
59	349.6000	5.214819144	303.9030713	279.7116381	521.4819144	0.11363255	0.15883047	Cumple	2.487279724	0.637	No Cumple
60	349.6000	5.2162578	305.1639549	280.8766022	521.62578	0.11946242	0.15750132	Cumple	2.422488362	0.637	No Cumple
61	349.6000	5.218218708	306.384909	282.0064707	521.8218708	0.12518706	0.15620499	Cumple	2.374287704	0.637	No Cumple
62	349.6000	5.220754933	307.5671116	283.1025079	522.0754933	0.13079817	0.15494015	Cumple	2.341203364	0.637	No Cumple
63	349.6000	5.223881591	308.7118979	284.1660047	522.3881591	0.13629098	0.15370555	Cumple	2.321993503	0.637	No Cumple
64	349.6000	5.227591859	309.8206673	285.1982412	522.7591859	0.14166305	0.1525	Cumple	2.315596167	0.637	No Cumple
65	358.8000	5.228117707	311.0431392	286.3252129	522.8117707	0.11051862	0.15132238	Cumple	2.253460666	0.637	No Cumple
66	358.8000	5.228106912	312.2365636	287.4237643	522.8106912	0.11585809	0.15017162	Cumple	2.208227035	0.637	No Cumple
67	358.8000	5.228282834	313.397568	288.4930634	522.8282834	0.12113326	0.14904672	Cumple	2.177601451	0.637	No Cumple
68	358.8000	5.228872185	314.5258678	289.5335752	522.8872185	0.1263251	0.14794673	Cumple	2.160155557	0.637	No Cumple
69	358.8000	5.229962461	315.6220059	290.5460915	522.9962461	0.13142416	0.14687074	Cumple	2.1547919	0.637	No Cumple
70	358.8000	5.231583304	316.6868424	291.5315134	523.1583304	0.13642545	0.14581789	Cumple	2.160607151	0.637	No Cumple
71	358.8000	5.233736206	317.7213703	292.4907737	523.3736206	0.14132647	0.14478736	Cumple	2.176832733	0.637	No Cumple
72	358.8000	5.236407981	318.7266328	293.4248026	523.6407981	0.14612623	0.14377838	No Cumple	2.202801661	0.637	No Cumple
73	358.8000	5.239577667	319.7036819	294.3345115	523.9577667	0.15082482	0.1427902	No Cumple	2.237927185	0.637	No Cumple
74	368.0000	5.240708014	320.779861	295.3289494	524.0708014	0.11883715	0.14182212	Cumple	2.208414444	0.637	No Cumple
75	368.0000	5.241316946	321.8341003	296.3015201	524.1316946	0.12350997	0.14087347	Cumple	2.192085541	0.637	No Cumple
76	368.0000	5.241993772	322.8633916	297.2513555	524.1993772	0.12813241	0.1399436	Cumple	2.18733275	0.637	No Cumple
77	368.0000	5.24293118	323.8672814	298.1786685	524.293118	0.1326895	0.1390319	Cumple	2.193162408	0.637	No Cumple
78	368.0000	5.244210303	324.8460166	299.0839529	524.4210303	0.13717383	0.1381378	Cumple	2.208805095	0.637	No Cumple
79	368.0000	5.245865242	325.8000955	299.9678042	524.5865242	0.1415814	0.13726072	No Cumple	2.233619735	0.637	No Cumple
80	368.0000	5.247906597	326.7301767	300.8308554	524.7906597	0.14591014	0.13640015	No Cumple	2.267053615	0.637	No Cumple
81	386.4000	5.244142889	327.8760879	301.8735059	524.4142889	0.08523738	0.13555556	Cumple	2.183284693	0.637	No Cumple
82	404.8000	5.228075236	329.269037	303.1025966	522.8075236	0.0441716	0.13472646	Cumple	2.048058734	0.637	No Cumple
83	294.4000	5.264825609	329.0124682	302.9881629	526.4825609	0.0248107	0.1339124	Cumple	2.002359853	0.637	No Cumple
84	294.4000	5.300972448	328.7636559	302.8777502	530.0972448	0.04085726	0.13311291	Cumple	1.963359604	0.637	No Cumple
85	294.4000	5.3365355	328.5222199	302.7711399	533.65355	0.03929718	0.13232758	Cumple	1.930922217	0.637	No Cumple
86	294.4000	5.371533524	328.2878058	302.6681298	537.1533524	0.03779801	0.13155598	Cumple	1.904914321	0.637	No Cumple
87	294.4000	5.405984364	328.0600823	302.5685317	540.5984364	0.03635705	0.13079773	Cumple	1.885205008	0.637	No Cumple
88	294.4000	5.439905007	327.8387397	302.4721708	543.9905007	0.03497175	0.13005244	Cumple	1.871665893	0.637	No Cumple
89	294.4000	5.473311636	327.6234879	302.3788842	547.3311636	0.0336397	0.12931974	Cumple	1.864171142	0.637	No Cumple
90	331.2000	5.499104102	327.8865136	302.7024962	549.9104102	0.03358884	0.12859929	Cumple	1.857226727	0.637	No Cumple
91	331.2000	5.524541374	328.1440762	303.0196379	552.4541374	0.03353908	0.12789075	Cumple	1.856932046	0.637	No Cumple
92	331.2000	5.549635531	328.3963149	303.3304884	554.9635531	0.03349019	0.12719379	Cumple	1.863101824	0.637	No Cumple
93	331.2000	5.574397966	328.6433658	303.635221	557.4397966	0.03344196	0.12650811	Cumple	1.875557651	0.637	No Cumple
94	331.2000	5.598839444	328.885362	303.9340036	559.8839444	0.03339421	0.12583339	Cumple	1.894127696	0.637	No Cumple
95	331.2000	5.622970147	329.1224334	304.2269898	562.2970147	0.03334677	0.12516936	Cumple	1.918646435	0.637	No Cumple
96	340.4000	5.642718578	329.4726712	304.6110092	564.2718578	0.03367279	0.12451573	Cumple	1.946710615	0.637	No Cumple
97	340.4000	5.662248073	329.8157159	304.9875748	566.2248073	0.03399265	0.12387223	Cumple	1.980907215	0.637	No Cumple
98	340.4000	5.681565868	330.151764	305.3569018	568.1565868	0.03430635	0.12323861	Cumple	2.021051068	0.637	No Cumple
99	377.2000	5.680934952	330.9384058	306.082552	568.0934952	0.03620479	0.12261461	Cumple	1.982265074	0.637	No Cumple
100	377.2000	5.680378977	331.7107813	306.7952259	568.0378977	0.03811483	0.122	Cumple	1.953327312	0.637	No Cumple
100	331'5000	2'800318011	331'1703873	306'1825328	268'0318011	0'03817'483	0'155	Cumple	1'823353175	0'637	No Cumple
101	331'5000	2'80034825	330'8384028	306'083225	268'0350418	0'03850418	0'155	Cumple	1'835362014	0'637	No Cumple
102	340'4000	2'881262888	330'121564	302'3280078	278'1262888	0'03430832	0'15333881	Cumple	1'857027088	0'637	No Cumple
103	340'4000	2'883548013	330'8723128	304'0812148	280'5548013	0'03388562	0'15381553	Cumple	1'880801572	0'637	No Cumple
104	340'4000	2'884518218	330'4158175	304'0170085	284'5178218	0'03385338	0'15427213	Cumple	1'8845170872	0'637	No Cumple
105	331'5000	2'853810741	330'1534334	304'5588888	265'5810741	0'03334813	0'15278888	Cumple	1'878884932	0'637	No Cumple
106	331'5000	2'888838444	330'882385	303'0340036	228'8838444	0'03338457	0'15283338	Cumple	1'884515888	0'637	No Cumple
107	331'5000	2'214381888	330'8433828	303'823521	221'4381888	0'03344788	0'15288881	Cumple	1'812221827	0'637	No Cumple
108	331'5000	2'248822237	330'3883148	303'3304884	224'8822237	0'03348078	0'153178318	Cumple	1'883707854	0'637	No Cumple
109	331'5000	2'254247314	330'1440185	303'0788318	225'4247314	0'03323808	0'153188012	Cumple	1'828835048	0'637	No Cumple
110	331'5000	2'488704705	331'8882738	305'1054885	248'704705	0'03328884	0'15288885	Cumple	1'821558131	0'637	No Cumple
111	384'4000	2'413371838	331'8348138	305'3188845	241'3371838	0'03388381	0'15387814	Cumple	1'884517145	0'637	No Cumple
112	384'4000	2'438802001	331'8381381	305'4157108	243'8802001	0'03481312	0'153002544	Cumple	1'817882883	0'637	No Cumple
113	384'4000	2'402884384	330'0800853	305'2882371	240'2884384	0'03832102	0'15301313	Cumple	1'882502008	0'637	No Cumple
114	384'4000	2'311723254	330'5818828	305'8882371	231'723254	0'03118807	0'153722288	Cumple	1'804874357	0'637	No Cumple
115	384'4000	2'3382322	330'5557188	305'1171888	233'82322	0'03858178	0'15355128	Cumple	1'830855571	0'637	No Cumple
116	384'4000	2'300815448	330'1888228	305'8111205	230'0815448	0'04082158	0'15371581	Cumple	1'883288884	0'637	No Cumple
117	384'4000	2'584852888	330'0154885	305'8887858	258'4852888	0'04548701	0'15387154	Cumple	1'805328823	0'637	No Cumple
118	404'8000	2'538012538	330'588013	305'7052888	253'8012538	0'0447178	0'15415848	Cumple	1'804828134	0'637	No Cumple
119	384'4000	2'544745888	331'8188813	307'8138828	254'4745888	0'08253138	0'152222228	Cumple	1'883588888	0'637	No Cumple
120	388'0000	2'541888281	330'1307181	300'8388281	254'1888281	0'14287014	0'15840012	No Cumple	1'582023872	0'637	No Cumple
121	388'0000	2'542882545	332'8000822	308'8881845	254'2882545	0'1472814	0'153188013	No Cumple	1'533878132	0'637	No Cumple
122	388'0000	2'544570303	334'8488708	308'0882558	254'4570303	0'13111383	0'15877158	Cumple	1'508802082	0'637	No Cumple
123	388'0000	2'545871718	333'8813874	308'1388882	254'5871718	0'13588882	0'15888718	Cumple	1'583785488	0'637	No Cumple
124	388'0000	2'547881115	335'8838818	308'5212222	254'7881115	0'13871547	0'15884888	Cumple	1'581335132	0'637	No Cumple

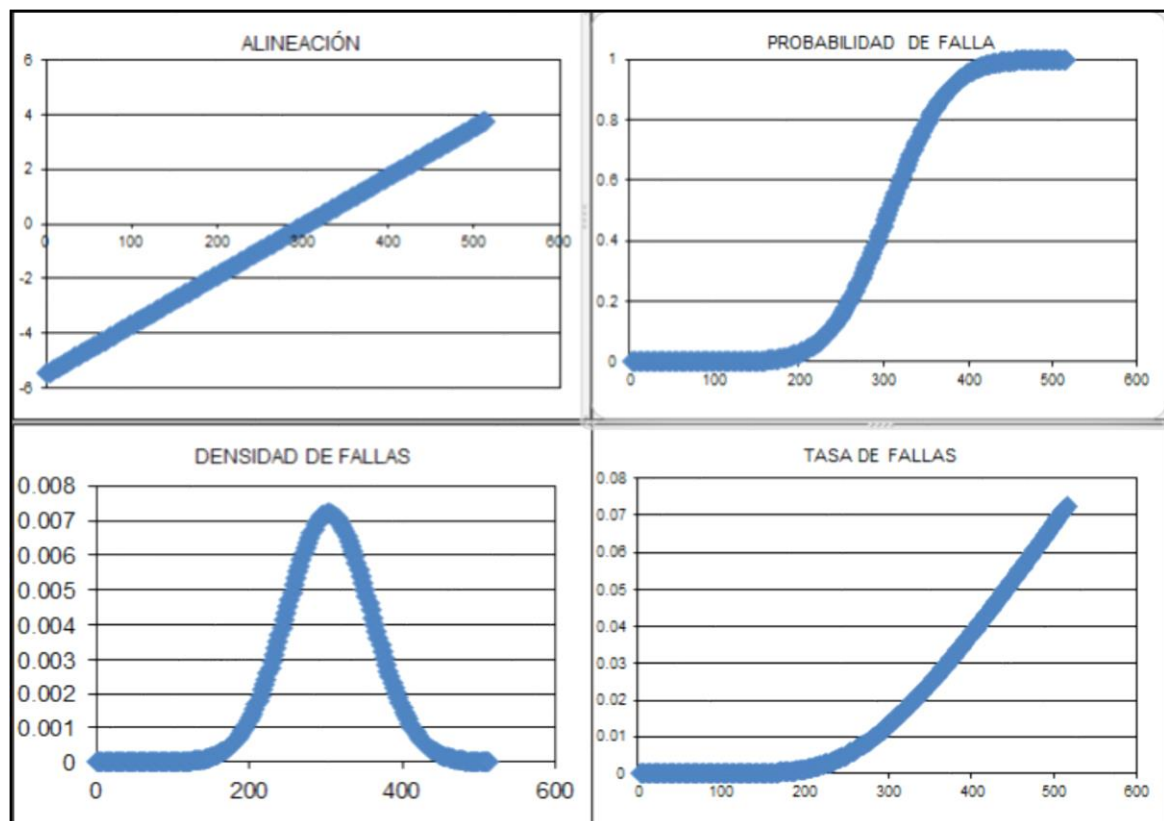




En general Ciclo 1 de filamento, permite aseverar que su comportamiento es de Fase III; por varios motivos: el comportamiento de su Tasa de Fallas es creciente, su densidad tiene una distribución normal, su indicador de Bondad de Ajuste K-S es bueno, más no así con A-D (Anderson – Darling), la alineación es creciente en su pendiente (típica Fase III), tiene un  $\beta$  siempre mayor a 2 que posteriormente se estabiliza en 5.6 (típico de Fase III Davies), con permanente crecimiento, lo anterior más el hecho de que la Probabilidad de falla individual siempre es creciente, permite asegurar que se comportan bajo los síntomas de Fase III de Zona III de distribución Normal en la curva de Davies.

Al aplicar con Ciclo 1, en BaseCMD con Distribución Normal, se obtienen las siguientes curvas de parámetros de confiabilidad.

Ilustración 60 - Curvas de Ciclo 1 con BaseCMD de Distribución Normal



Igual que en el caso anterior con Weibull, en este caso la Tasa de fallas es creciente, la Probabilidad de falla también, la pendiente de la alineación es positiva e importante, y la densidad es asimilable un comportamiento de Distribución Normal, de este análisis con Distribución Normal en Ciclo 1, también se deriva que el comportamiento de los Bombillos de filamento es típico de Fase III de la curva de Davies.

#### 4.3.2.2 Estudio de los bombillos incandescentes de Lote Inicial Ciclo 1 y 2, juntos con Programa BaseCMD

Cuando se aplica el programa conjunto de los paquetes BaseCMD y CMDMúltiple, muestra el comportamiento que se detalla a continuación con Weibull de los bombillos de filamento Ciclos 1 y 2.

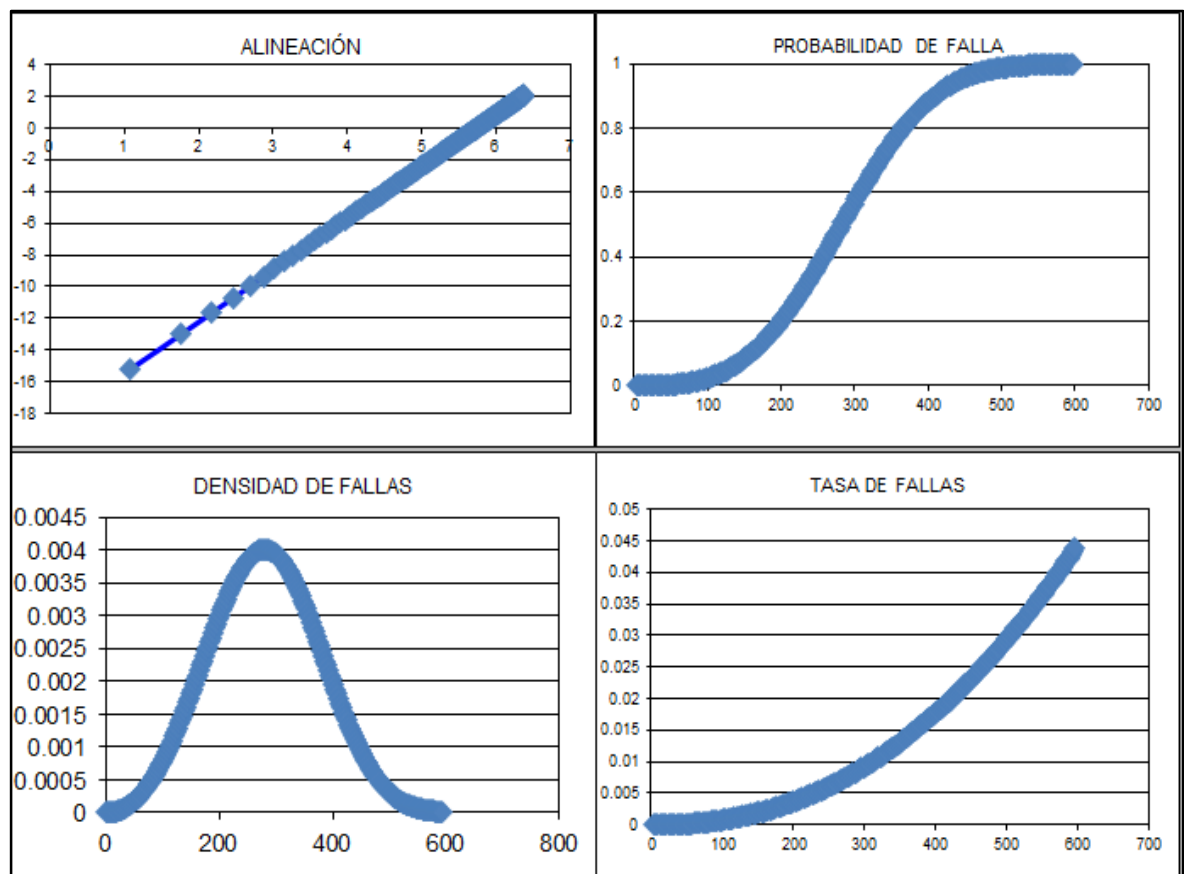
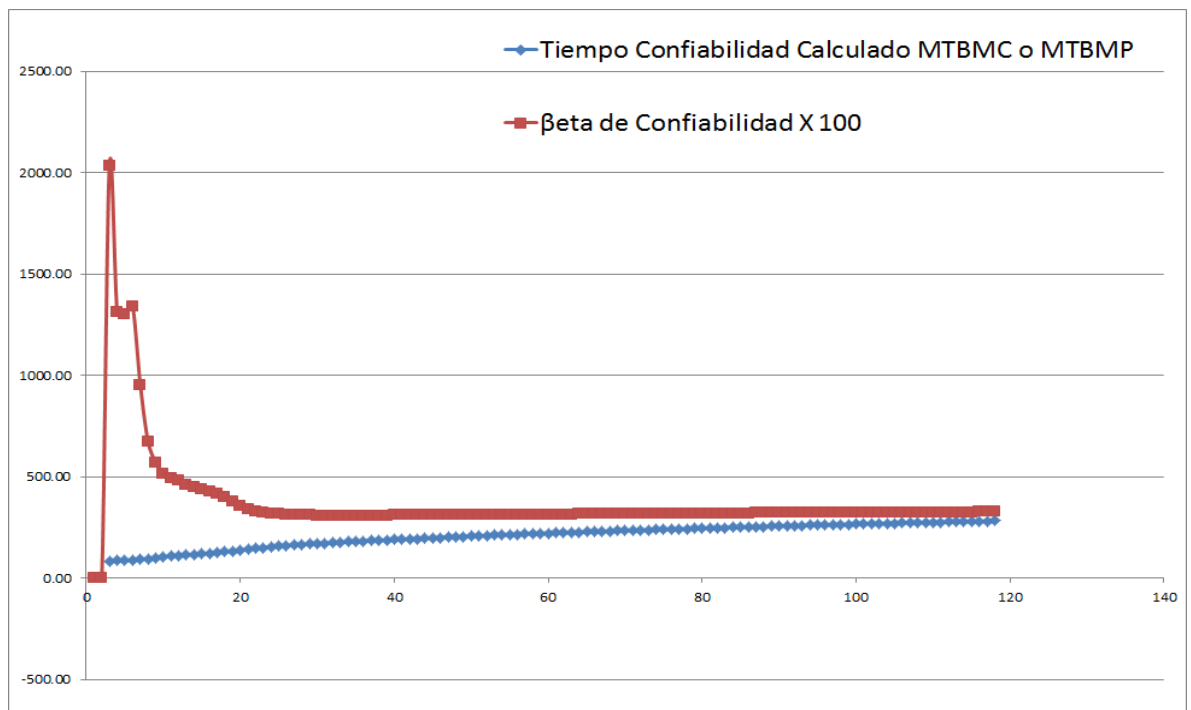
Ilustración 61 - Comportamiento Bombillos Ciclos 1 y 2 Weibull y Ajuste K-S<sup>3</sup> y A-D

Dato Número	Tiempo	Parámetro 1	Parámetro 2	Tiempo Confiabilidad Calculado MTBM <sub>c</sub> o MTBM <sub>p</sub>	β de Confiabilidad X 100	Bondades de Ajuste - Kolmogorov - Smirnov			Bondades de Ajuste - Anderson & Darling		
		β de Confiabilidad	η - Eta			Valor Prueba Real	Valor Critico	Cumple o No	Valor Prueba Real	Valor Critico	Cumple o No
1	79.3333				0						
2	85.4286				0						
3	85.6667	20.344	85.326	83.10	2034.437322	0.1322	0.64	Cumple	0.428316012	0.637	Cumple
4	94.6667	13.125	89.295	85.85	1312.464094	0.0429	0.56	Cumple	0.334633244	0.637	Cumple
5	94.6667	13.022	91.122	87.58	1302.219201	0.0636	0.51	Cumple	0.375747044	0.637	Cumple
6	94.6667	13.388	92.253	88.75	1338.849625	0.1340	0.47	Cumple	0.511726973	0.637	Cumple
7	110.0000	9.541	96.629	91.74	954.1149251	0.0627	0.44	Cumple	0.500985691	0.637	Cumple
8	125.3333	6.752	102.815	96.00	675.1674643	0.0611	0.41	Cumple	0.592406406	0.637	Cumple
9	133.0000	5.713	108.278	100.18	571.2789003	0.0352	0.39	Cumple	0.583757818	0.637	Cumple
10	140.6667	5.128	113.423	104.29	512.7569559	0.0183	0.37	Cumple	0.550587905	0.637	Cumple
11	140.6667	4.899	117.384	107.65	489.9003823	0.0269	0.35	Cumple	0.566691483	0.637	Cumple
12	140.6667	4.803	120.574	110.45	480.3178636	0.0664	0.34	Cumple	0.622425235	0.637	Cumple
13	156.0000	4.586	124.757	113.97	458.5571425	0.0094	0.33	Cumple	0.533820053	0.637	Cumple
14	156.0000	4.467	128.281	117.02	446.7238056	0.0424	0.31	Cumple	0.526791066	0.637	Cumple
15	156.0000	4.405	131.289	119.66	440.5145163	0.0725	0.30	Cumple	0.567640562	0.637	Cumple
16	171.3333	4.272	135.084	122.90	427.1733109	0.0206	0.30	Cumple	0.490134341	0.637	Cumple
17	179.0000	4.137	138.990	126.22	413.6515448	0.0178	0.29	Cumple	0.431879549	0.637	Cumple
18	186.6667	4.006	142.974	129.60	400.6446088	0.0164	0.28	Cumple	0.389918532	0.637	Cumple
19	209.6667	3.798	148.076	133.82	379.7829805	0.0125	0.27	Cumple	0.335981929	0.637	Cumple
20	230.0000	3.564	153.948	138.65	356.4385841	0.0191	0.26	Cumple	0.3365499	0.637	Cumple
21	230.0000	3.413	159.196	143.05	341.2716134	0.0028	0.26	Cumple	0.379728616	0.637	Cumple
22	230.0000	3.310	163.924	147.07	331.0305775	0.0153	0.25	Cumple	0.434042615	0.637	Cumple
23	230.0000	3.239	168.215	150.75	323.9260167	0.0337	0.25	Cumple	0.496656892	0.637	Cumple
24	230.0000	3.189	172.132	154.15	318.9278411	0.0518	0.24	Cumple	0.568984896	0.637	Cumple
25	230.0000	3.154	175.727	157.28	315.4054725	0.0690	0.24	Cumple	0.652326035	0.637	No Cumple
26	230.0000	3.130	179.040	160.19	312.9522562	0.0854	0.24	Cumple	0.747318461	0.637	No Cumple
27	230.0000	3.113	182.104	162.89	311.294536	0.1008	0.23	Cumple	0.85407257	0.637	No Cumple
28	230.0000	3.102	184.947	165.41	310.2416038	0.1153	0.23	Cumple	0.972362885	0.637	No Cumple
29	230.0000	3.097	187.593	167.76	309.6566433	0.1288	0.22	Cumple	1.101771785	0.637	No Cumple
30	230.0000	3.094390766	190.0611372	169.9583655	309.4390766	0.14155401	0.22	Cumple	1.241783067	0.637	No Cumple
31	239.2000	3.090925087	192.6593238	172.2728132	309.0925087	0.11971089	0.218	Cumple	1.310290712	0.637	No Cumple
32	239.2000	3.089140223	195.1112659	174.460645	308.9140223	0.13153675	0.216	Cumple	1.395568196	0.637	No Cumple
33	248.4000	3.085078147	197.6967964	176.7617943	308.5078147	0.1113643	0.214	Cumple	1.421019712	0.637	No Cumple
34	248.4000	3.082288922	200.149915	178.947688	308.2288922	0.12251845	0.212	Cumple	1.467352586	0.637	No Cumple
35	248.4000	3.081208365	202.472734	181.021527	308.1208365	0.13320778	0.21	Cumple	1.532207366	0.637	No Cumple
36	248.4000	3.081767046	204.672592	182.9898445	308.1767046	0.14342003	0.20333333	Cumple	1.613484533	0.637	No Cumple
37	248.4000	3.08379636	206.7575821	184.8595541	308.379636	0.15316411	0.20056676	Cumple	1.709432382	0.637	No Cumple
38	248.4000	3.087114069	208.735602	186.6373273	308.7114069	0.16245792	0.19791013	Cumple	1.818591532	0.637	No Cumple
39	248.4000	3.091549166	210.6140752	188.3294152	309.1549166	0.17132324	0.19535635	Cumple	1.93973542	0.637	No Cumple
40	248.4000	3.096948904	212.3998772	189.941606	309.6948904	0.17978326	0.19289894	Cumple	2.07182195	0.637	No Cumple
41	248.4000	3.103179666	214.0993347	191.4792317	310.3179666	0.1878613	0.19053199	Cumple	2.213956255	0.637	No Cumple
42	248.4000	3.110125648	215.7182544	192.9471935	311.0125648	0.19558009	0.18825009	No Cumple	2.365362279	0.637	No Cumple
43	266.8000	3.11527979	217.6534646	194.6931764	311.527979	0.13560618	0.18604826	Cumple	2.358557862	0.637	No Cumple
44	276.0000	3.11676388	219.7297888	196.5548468	311.676388	0.11487921	0.18392192	Cumple	2.303868802	0.637	No Cumple
45	276.0000	3.117649724	221.7392626	198.3550184	311.7649724	0.1228278	0.18186686	Cumple	2.27253595	0.637	No Cumple
46	276.0000	3.118725036	223.6757489	200.0905162	311.8725036	0.13060969	0.17987919	Cumple	2.262123223	0.637	No Cumple
47	276.0000	3.120245348	225.5394243	201.7622841	312.0245348	0.13818838	0.17795529	Cumple	2.270465609	0.637	No Cumple
48	276.0000	3.122298689	227.3323341	203.3724509	312.2298689	0.14554818	0.17609183	Cumple	2.295701711	0.637	No Cumple
49	285.2000	3.123055013	229.2348908	205.0768159	312.3055013	0.12414146	0.17428571	Cumple	2.269394919	0.637	No Cumple
50	285.2000	3.123801162	231.0761558	206.7263552	312.3801162	0.13129764	0.17253405	Cumple	2.262094091	0.637	No Cumple
51	285.2000	3.124922587	232.853823	208.3202097	312.4922587	0.13828384	0.17083417	Cumple	2.271906873	0.637	No Cumple
52	285.2000	3.126518366	234.569131	209.8598244	312.6518366	0.14508415	0.16918356	Cumple	2.297227639	0.637	No Cumple

<sup>3</sup> K-S Kolmogórov-Smirnov, el cual trabaja muy bien en las puntas de la cola izquierda y derecha.

Dato Número	Tiempo	Parámetro 1	Parámetro 2	Tiempo Confiabilidad Calculado $MTBM_c$ o $MTBM_p$	βeta de Confiabilidad X 100	Bondades de Ajuste - Kolmogorov - Smirnov			Bondades de Ajuste - Anderson & Darling		
		βeta de Confiabilidad	η - Eta			Valor Prueba Real	Valor Crítico	Cumple o No	Valor Prueba Real	Valor Crítico	Cumple o No
52	285.2000	3.126518366	234.569131	209.8598244	312.6518366	0.14508415	0.16918356	Cumple	2.297227639	0.637	No Cumple
53	285.2000	3.128608343	236.2242133	211.3472014	312.8608343	0.15169307	0.16757989	Cumple	2.336680797	0.637	No Cumple
54	294.4000	3.129789743	237.9803447	212.9221747	312.9789743	0.12995141	0.16602097	Cumple	2.323148245	0.637	No Cumple
55	294.4000	3.130912889	239.6852575	214.4511903	313.0912889	0.13639327	0.16450477	Cumple	2.326088904	0.637	No Cumple
56	294.4000	3.132308477	241.3365987	215.9332105	313.2308477	0.14269434	0.16302936	Cumple	2.343955906	0.637	No Cumple
57	294.4000	3.134066603	242.9351317	217.3692286	313.4066603	0.14884162	0.16159295	Cumple	2.375466268	0.637	No Cumple
58	294.4000	3.136210863	244.4824171	218.7607393	313.6210863	0.1548305	0.16019385	Cumple	2.419517289	0.637	No Cumple
59	294.4000	3.138738266	245.980288	220.1093938	313.8738266	0.16066033	0.15883047	No Cumple	2.475149575	0.637	No Cumple
60	294.4000	3.141633786	247.43066	221.4168758	314.1633786	0.16633256	0.15750132	No Cumple	2.541521684	0.637	No Cumple
61	303.6000	3.144080913	248.9722962	222.8046425	314.4080913	0.14337181	0.15620499	Cumple	2.550186554	0.637	No Cumple
62	303.6000	3.146360834	250.4746941	224.1568334	314.6360834	0.14893256	0.15494015	Cumple	2.572215458	0.637	No Cumple
63	303.6000	3.148758605	251.9353916	225.4721994	314.8758605	0.15438357	0.15370555	No Cumple	2.606455621	0.637	No Cumple
64	303.6000	3.151360698	253.3546312	226.7512563	315.1360698	0.15971457	0.1525	No Cumple	2.651984847	0.637	No Cumple
65	303.6000	3.154198257	254.7333633	227.99497	315.4198257	0.16492188	0.15132238	No Cumple	2.708008438	0.637	No Cumple
66	312.8000	3.156569781	256.1989451	229.3149175	315.6569781	0.14238941	0.15017162	Cumple	2.708525826	0.637	No Cumple
67	312.8000	3.158734618	257.6308946	230.6041379	315.8734618	0.14751444	0.14904672	Cumple	2.721974747	0.637	No Cumple
68	312.8000	3.16095867	259.0266534	231.8612561	316.095867	0.15255204	0.14794673	No Cumple	2.747254847	0.637	No Cumple
69	312.8000	3.163329144	260.3861636	233.0865273	316.3329144	0.15749185	0.14687074	No Cumple	2.783502518	0.637	No Cumple
70	322.0000	3.165114223	261.8297779	234.3851055	316.5114223	0.13598876	0.14581789	Cumple	2.768587792	0.637	No Cumple
71	322.0000	3.16669181	263.2427829	235.6556146	316.669181	0.14085933	0.14478736	Cumple	2.766813533	0.637	No Cumple
72	322.0000	3.168313293	264.6225919	236.8966242	316.8313293	0.14565822	0.14377838	No Cumple	2.777056149	0.637	No Cumple
73	322.0000	3.17006498	265.9689732	238.1082378	317.006498	0.15037477	0.1427902	No Cumple	2.798441479	0.637	No Cumple
74	322.0000	3.171984682	267.2823586	239.2909835	317.1984682	0.15500392	0.14182212	No Cumple	2.830219973	0.637	No Cumple
75	322.0000	3.174088927	268.5634509	240.4455576	317.4088927	0.15954331	0.14087347	No Cumple	2.871731393	0.637	No Cumple
76	322.0000	3.176383225	269.8130783	241.5727289	317.6383225	0.16399203	0.1399436	No Cumple	2.922386871	0.637	No Cumple
77	322.0000	3.178866893	271.0321262	242.6732949	317.8866893	0.16835016	0.1390319	No Cumple	2.981657121	0.637	No Cumple
78	322.0000	3.181535633	272.2215011	243.7480583	318.1535633	0.17261838	0.1381378	No Cumple	3.049063691	0.637	No Cumple
79	322.0000	3.184383023	273.3821108	244.7978146	318.4383023	0.17679782	0.13726072	No Cumple	3.12417207	0.637	No Cumple
80	331.2000	3.187106472	274.6160488	245.9128665	318.7106472	0.15383184	0.13640015	No Cumple	3.141751791	0.637	No Cumple
81	331.2000	3.189618876	275.8271724	247.0067926	318.9618876	0.1579668	0.13555556	No Cumple	3.169420604	0.637	No Cumple
82	331.2000	3.19212077	277.0131939	248.0782841	319.212077	0.16204409	0.13472646	No Cumple	3.206365027	0.637	No Cumple
83	331.2000	3.194680895	278.1737944	249.1273115	319.4680895	0.16605619	0.1339124	No Cumple	3.251996183	0.637	No Cumple
84	331.2000	3.197330619	279.3091942	250.1541912	319.7330619	0.16999978	0.13311291	No Cumple	3.305815844	0.637	No Cumple
85	331.2000	3.200085246	280.4198317	251.1593757	320.0085246	0.17387341	0.13232758	No Cumple	3.367383724	0.637	No Cumple
86	340.4000	3.202664987	281.6004095	252.2266226	320.2664987	0.15142839	0.13155598	No Cumple	3.373793784	0.637	No Cumple
87	340.4000	3.205018647	282.7613219	253.2754722	320.5018647	0.15527118	0.13079773	No Cumple	3.390159486	0.637	No Cumple
88	340.4000	3.207333778	283.9030236	254.3046039	320.7333778	0.15906854	0.13005244	No Cumple	3.415684092	0.637	No Cumple
89	349.6000	3.209211577	285.1096467	255.3951465	320.9211577	0.13819099	0.12931974	No Cumple	3.392673107	0.637	No Cumple
90	349.6000	3.210841561	286.3003881	256.4681241	321.0841561	0.1419658	0.12859929	No Cumple	3.380658424	0.637	No Cumple
91	349.6000	3.212417089	287.4701018	257.5221056	321.2417089	0.14570567	0.12789075	No Cumple	3.37874553	0.637	No Cumple
92	349.6000	3.214012654	288.618187	258.5568408	321.4012654	0.14940194	0.12719379	No Cumple	3.386283283	0.637	No Cumple
93	349.6000	3.215666451	289.7445854	259.5724274	321.5666451	0.15305	0.12650811	No Cumple	3.402722672	0.637	No Cumple
94	349.6000	3.21739999	290.8494798	260.5691154	321.739999	0.15664714	0.12583339	No Cumple	3.427578741	0.637	No Cumple
95	349.6000	3.219225633	291.9331777	261.5472318	321.9225633	0.16019175	0.12516936	No Cumple	3.460415834	0.637	No Cumple
96	349.6000	3.221150225	292.9960573	262.507145	322.1150225	0.16368293	0.12451573	No Cumple	3.500838343	0.637	No Cumple
97	349.6000	3.223177082	294.0385366	263.4492459	322.3177082	0.16712027	0.12387223	No Cumple	3.548484595	0.637	No Cumple
98	349.6000	3.225307187	295.0610561	264.3739357	322.5307187	0.17050369	0.12323861	No Cumple	3.603022314	0.637	No Cumple
99	358.8000	3.227302506	296.1455917	265.3537115	322.7302506	0.14898155	0.12261461	No Cumple	3.605468088	0.637	No Cumple
100	358.8000	3.22911697	297.2146319	266.3189317	322.911697	0.15233913	0.122	No Cumple	3.616824533	0.637	No Cumple
101	358.8000	3.230899944	298.2662161	267.268436	323.0899944	0.15566393	0.12139454	No Cumple	3.636388262	0.637	No Cumple
102	358.8000	3.232705328	299.2998986	268.2020418	323.2705328	0.15894992	0.120798	No Cumple	3.66368014	0.637	No Cumple
103	358.8000	3.234559688	300.3156571	269.1198375	323.4559688	0.16219411	0.12021017	No Cumple	3.698301981	0.637	No Cumple
104	358.8000	3.236477614	301.3136492	270.0220247	323.6477614	0.16539484	0.11963084	No Cumple	3.739930312	0.637	No Cumple
105	358.8000	3.238467338	302.2941224	270.9088604	323.8467338	0.16855123	0.11905981	No Cumple	3.788167105	0.637	No Cumple
106	358.8000	3.240533346	303.2573735	271.7806308	324.0533346	0.17166282	0.11849688	No Cumple	3.842804676	0.637	No Cumple
107	358.8000	3.242677555	304.2037269	272.637637	324.2677755	0.17472951	0.11794185	No Cumple	3.903549367	0.637	No Cumple
108	368.0000	3.24475658	305.2074432	273.5458395	324.475658	0.15314976	0.11739455	No Cumple	3.911690888	0.637	No Cumple
109	368.0000	3.246657166	306.1983251	274.4418534	324.6657166	0.1561994	0.11685481	No Cumple	3.927882529	0.637	No Cumple
110	368.0000	3.248512845	307.1745333	275.3245795	324.8512845	0.15922265	0.11632244	No Cumple	3.951490667	0.637	No Cumple
111	368.0000	3.25037255	308.1355991	276.1938	325.037255	0.16221417	0.11579728	No Cumple	3.982100778	0.637	No Cumple
112	368.0000	3.252261036	309.0814392	277.0495436	325.2261036	0.16517126	0.11527916	No Cumple	4.019373335	0.637	No Cumple
113	368.0000	3.254192422	310.0121349	277.8919427	325.4192422	0.16809239	0.11476795	No Cumple	4.063010737	0.637	No Cumple
114	368.0000	3.256175148	310.9278519	278.721182	325.6175148	0.17097668	0.11426347	No Cumple	4.112744525	0.637	No Cumple
115	377.2000	3.258058478	311.8983695	279.5991751	325.8058478	0.14996183	0.11376559	No Cumple	4.112017462	0.637	No Cumple
116	377.2000	3.25976597	312.8575469	280.4663029	325.976597	0.15283273	0.11327416	No Cumple	4.119207041	0.637	No Cumple
117	386.4000	3.261095144	313.8737374	281.3829695	326.1095144	0.13352444	0.11278904	No Cumple	4.083103008	0.637	No Cumple
118	404.8000	3.260976865	315.0241161	282.4137584	326.0976865	0.09789544	0.1123101	Cumple	3.973332102	0.637	No Cumple



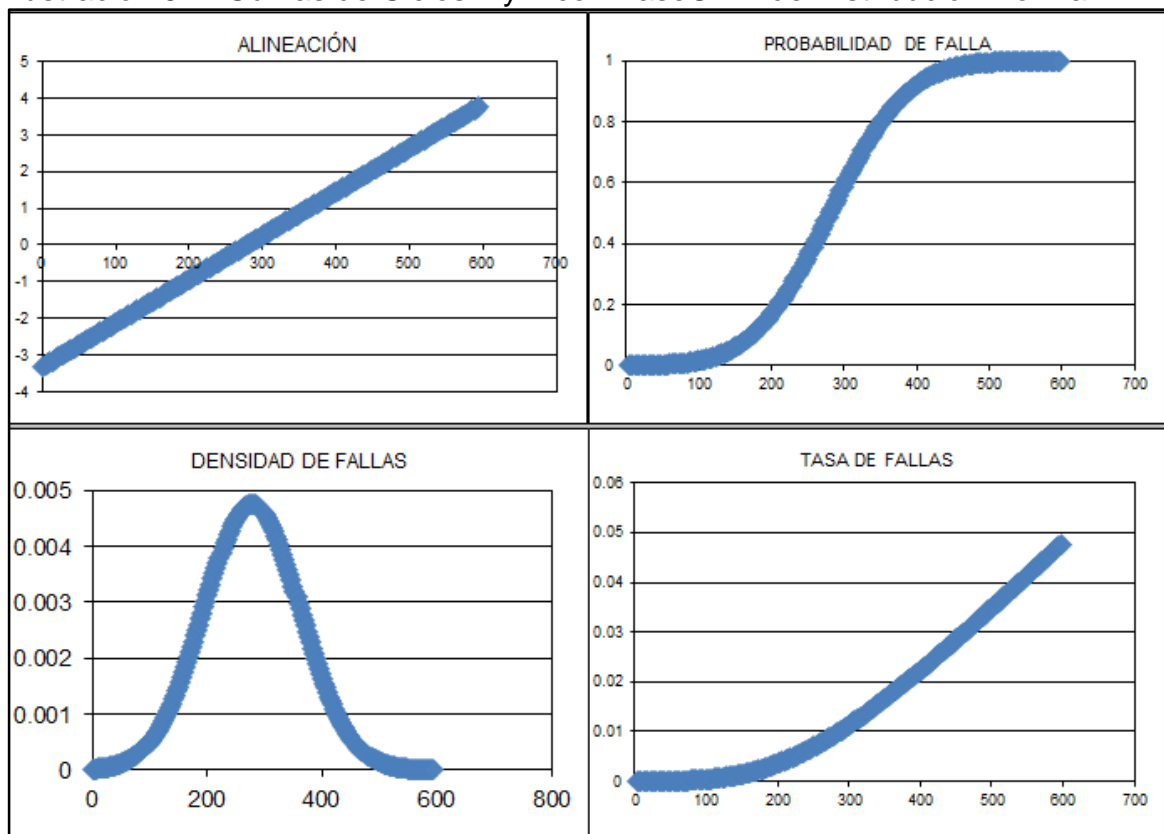




Los estudios presentes de Ciclos 1 y 2 de filamento, permiten asegurar que su conducta es habitual de Fase III; por diversos argumentos: primero, el comportamiento de su Tasa de Fallas es creciente, su densidad se asemeja a una distribución normal, su indicador de Bondad de Ajuste K-S está bien al menos en el último dato que se obtiene, más no así con A-D (Anderson – Darling), la alineación es creciente en su pendiente (típica Fase III), más no así con A-D (Anderson – Darling), posee un  $\beta$  estable sobre 3.26 (de Fase III Zona 3 en Davies) y con crecimiento continuo, además de que la Probabilidad de falla individual es creciente, permite asegurar que se comportan los datos de ciclo combinado 1 y 2 bajo un esquema de pura Fase III de envejecimiento en la curva de Davies.

Al aplicar con Ciclo 1 y 2, en el programa BaseCMD con Distribución Normal, se obtienen las siguientes curvas de parámetros de confiabilidad.

Ilustración 62 - Curvas de Ciclos 1 y 2 con BaseCMD de Distribución Normal



Similar a Weibull, la Tasa y la Probabilidad de falla son crecientes, al igual que la pendiente de la alineación es positiva e importante, y la densidad es poseer un comportamiento de Distribución Normal, de este análisis con Distribución Normal en Ciclos 1 y 2, se reafirma que los Bombillos de filamento es típico de Fase III de la curva de Davies.

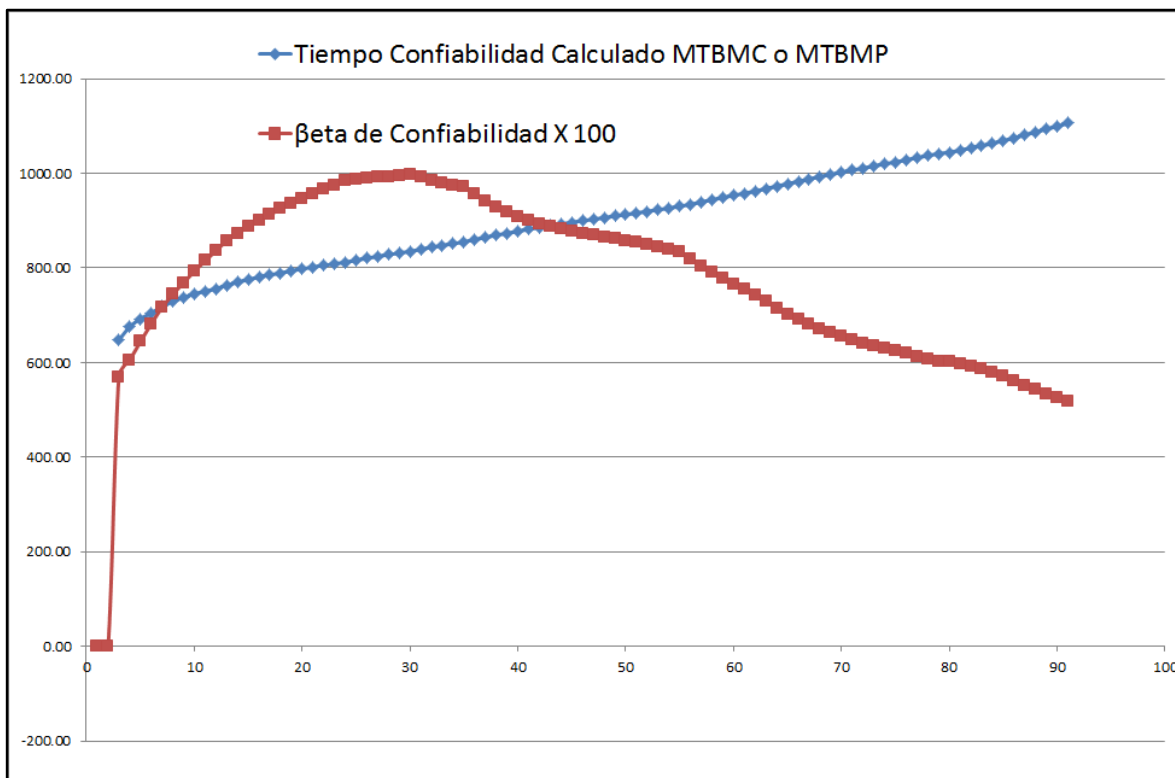
#### 4.3.2.3 Estudio de los bombillos LED con Programa BaseCMD & CMDMúltiple

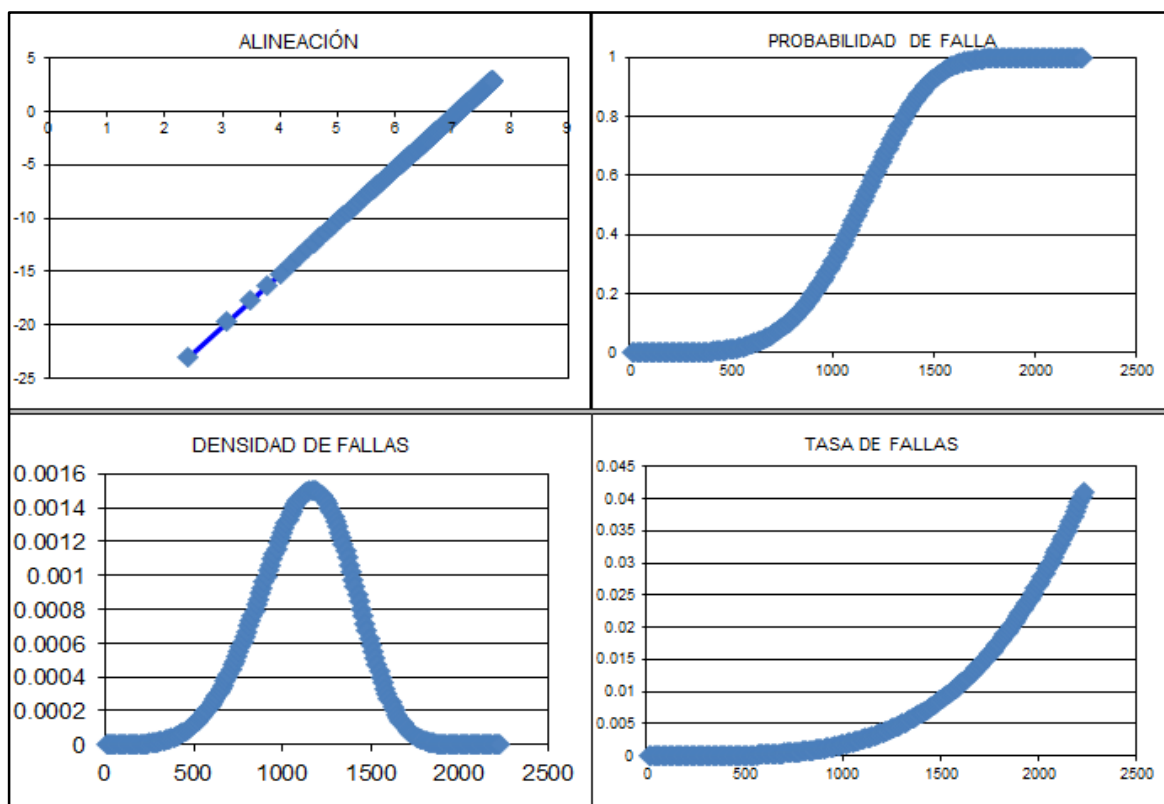
Cuando se aplica el programa conjunto de los paquetes BaseCMD y CMDMúltiple, muestra el comportamiento que se detalla a continuación con Weibull de los bombillos LED.

#### Ilustración 63 - Comportamiento Bombillos LED Weibull y Ajuste K-S y A-D

Dato Número	Tiempo	Parámetro 1	Parámetro 2	Tiempo Confiabilidad Calculado $MTBM_c$ o $MTBM_p$	$\beta$ eta de Confiabilidad X 100	Bondades de Ajuste - Kolmogorov - Smirnov			Bondades de Ajuste - Anderson & Darling		
		$\beta$ eta de Confiabilidad	$\eta$ - Eta			Valor Prueba Real	Valor Crítico	Cumple o No	Valor Prueba Real	Valor Crítico	Cumple o No
1	540.4000				0						
2	658.6857				0						
3	757.4286	5.693	700.232	647.71	569.2651619	0.0035	0.64	Cumple	0.209594339	0.637	Cumple
4	759.0286	6.050	727.851	675.55	605.0298927	0.1165	0.56	Cumple	0.343110918	0.637	Cumple
5	760.6286	6.445	743.896	692.83	644.4882069	0.1857	0.51	Cumple	0.54833765	0.637	Cumple
6	762.2286	6.818	754.390	704.71	681.7691747	0.2326	0.47	Cumple	0.788225631	0.637	No Cumple
7	803.2571	7.165	767.282	718.61	716.4710866	0.1548	0.44	Cumple	0.762504878	0.637	No Cumple
8	804.8571	7.442	777.327	729.42	744.1656373	0.1904	0.41	Cumple	0.825082682	0.637	No Cumple
9	806.4571	7.693	785.252	738.09	769.3323274	0.2186	0.39	Cumple	0.940093293	0.637	No Cumple
10	808.0571	7.929	791.657	745.21	792.9076611	0.2410	0.37	Cumple	1.088135147	0.637	No Cumple
11	809.6571	8.152	796.950	751.21	815.2493493	0.2592	0.35	Cumple	1.257612324	0.637	No Cumple
12	811.2571	8.366	801.412	756.34	836.5618252	0.2739	0.34	Cumple	1.441024915	0.637	No Cumple
13	852.2857	8.574	808.153	763.59	857.3772451	0.1542	0.33	Cumple	1.307106143	0.637	No Cumple
14	853.8857	8.732	814.245	770.00	873.1866637	0.1713	0.31	Cumple	1.245870142	0.637	No Cumple
15	855.4857	8.872	819.672	775.70	887.2015588	0.1865	0.30	Cumple	1.235438212	0.637	No Cumple
16	857.0857	9.003	824.520	780.80	900.3177542	0.1997	0.30	Cumple	1.261913524	0.637	No Cumple
17	858.6857	9.129	828.875	785.42	912.8768354	0.2112	0.29	Cumple	1.315766087	0.637	No Cumple
18	860.2857	9.250	832.814	789.62	925.0314141	0.2212	0.28	Cumple	1.390167928	0.637	No Cumple
19	875.0286	9.366	837.080	794.10	936.6056814	0.1838	0.27	Cumple	1.370949196	0.637	No Cumple
20	876.6286	9.469	841.035	798.24	946.885199	0.1932	0.26	Cumple	1.382013146	0.637	No Cumple
21	878.2286	9.566	844.691	802.07	956.5785206	0.2016	0.26	Cumple	1.415776196	0.637	No Cumple
22	879.8286	9.659	848.082	805.62	965.9168116	0.2090	0.25	Cumple	1.467049039	0.637	No Cumple
23	881.4286	9.750	851.237	808.95	975.0017528	0.2155	0.25	Cumple	1.531926123	0.637	No Cumple
24	883.0286	9.839	854.183	812.07	983.884388	0.2213	0.24	Cumple	1.607359301	0.637	No Cumple
25	924.0571	9.880	858.665	816.47	987.9608431	0.0993	0.24	Cumple	1.42587075	0.637	No Cumple
26	925.6571	9.902	862.959	820.63	990.1505083	0.1085	0.24	Cumple	1.298907118	0.637	No Cumple
27	927.2571	9.919	867.023	824.56	991.8967625	0.1172	0.23	Cumple	1.212173409	0.637	No Cumple
28	928.8571	9.936	870.864	828.27	993.613229	0.1253	0.23	Cumple	1.156717936	0.637	No Cumple
29	930.4571	9.954	874.497	831.79	995.4460186	0.1328	0.22	Cumple	1.126149729	0.637	No Cumple
30	932.0571	9.97443184	877.9377974	835.136118	997.443184	0.1396435	0.22	Cumple	1.115673867	0.637	No Cumple
31	973.0857	9.915766137	882.7765729	839.5283408	991.5766137	0.05001087	0.218	Cumple	0.964904802	0.637	No Cumple
32	974.6857	9.855659337	887.4127574	843.7183255	985.5659337	0.05880402	0.216	Cumple	0.862092349	0.637	No Cumple
33	976.2857	9.801887368	891.8250081	847.7145282	980.1887368	0.06728513	0.214	Cumple	0.793690164	0.637	No Cumple
34	977.8857	9.755651904	896.0217218	851.5305131	975.5651904	0.07535611	0.212	Cumple	0.75152987	0.637	No Cumple
35	979.4857	9.716680261	900.0171452	855.1799113	971.6680261	0.0829795	0.21	Cumple	0.730038352	0.637	No Cumple
36	1033.6571	9.558370938	905.8230795	860.083043	955.8370938	0.01001783	0.20333333	Cumple	0.63578443	0.637	Cumple
37	1035.2571	9.414972809	911.3797921	864.7857037	941.4972809	0.01744462	0.20056676	Cumple	0.586227965	0.637	Cumple
38	1036.8571	9.290161703	916.6720403	869.2938514	929.0161703	0.02500987	0.19791013	Cumple	0.564596621	0.637	Cumple
39	1038.4571	9.182372779	921.7126948	873.6191095	918.2372779	0.03255158	0.19535635	Cumple	0.561875472	0.637	Cumple
40	1040.0571	9.089357361	926.5193883	877.7735527	908.9357361	0.03996309	0.19289894	Cumple	0.57278319	0.637	Cumple
41	1043.2571	9.006344141	931.1617086	881.8060305	900.6344141	0.04490629	0.19053199	Cumple	0.590646729	0.637	Cumple
42	1044.8571	8.934221113	935.6033297	885.6887275	893.4221113	0.05188608	0.18825009	Cumple	0.617447218	0.637	Cumple
43	1046.4571	8.871550199	939.858732	889.4313678	887.1550199	0.05860648	0.18604826	Cumple	0.651519686	0.637	No Cumple
44	1048.0571	8.817028497	943.9417503	893.0430652	881.7028497	0.06504764	0.18392192	Cumple	0.69170199	0.637	No Cumple
45	1049.6571	8.769543966	947.8650717	896.5322325	876.9543966	0.07120015	0.18186686	Cumple	0.737132748	0.637	No Cumple
46	1051.2571	8.728157108	951.6402319	899.9066116	872.8157108	0.07706162	0.17987919	Cumple	0.787140606	0.637	No Cumple
47	1052.8571	8.69207455	955.2777002	903.173325	869.207455	0.08263452	0.17795529	Cumple	0.841178935	0.637	No Cumple
48	1054.4571	8.660624465	958.7869822	906.3389283	866.0624465	0.08792459	0.17609183	Cumple	0.898786141	0.637	No Cumple
49	1070.8000	8.620597768	962.5406382	909.6914484	862.0597768	0.06739555	0.17428571	Cumple	0.907371211	0.637	No Cumple
50	1072.4000	8.5832156	966.1821169	912.9481518	858.32156	0.07258259	0.17253405	Cumple	0.924968567	0.637	No Cumple
51	1087.1429	8.537441234	970.0296146	916.3547224	853.7441234	0.05730388	0.17083417	Cumple	0.909487556	0.637	No Cumple
52	1088.7429	8.494497458	973.7669129	919.6678785	849.4497458	0.06236519	0.16918356	Cumple	0.906060709	0.637	No Cumple
53	1105.0857	8.441599919	977.7441702	923.1530116	844.1599919	0.04704197	0.16757989	Cumple	0.872820357	0.637	No Cumple
54	1103.4857	8.395074044	981.5338853	926.4895337	839.5074044	0.05396074	0.16602097	Cumple	0.861256524	0.637	No Cumple
55	1119.8286	8.338961337	985.5570449	929.9917439	833.8961337	0.04232822	0.16450477	Cumple	0.825428043	0.637	No Cumple
56	1201.8857	8.186331443	991.5182466	934.7930015	818.6331443	0.00443573	0.16302936	Cumple	0.727682241	0.637	No Cumple
57	1203.4857	8.04523115	997.3203518	939.475942	804.523115	0.00146417	0.16159295	Cumple	0.684336373	0.637	No Cumple
58	1218.2286	7.901069506	1003.278696	944.257666	790.1069506	0.00228716	0.16019385	Cumple	0.674037682	0.637	No Cumple
59	1219.8286	7.77175035	1009.043993	948.914371	777.175035	0.00088928	0.15883047	Cumple	0.692598218	0.637	No Cumple
60	1221.4286	7.656042974	1014.619574	953.4490438	765.6042974	0.00436268	0.15750132	Cumple	0.728717684	0.637	No Cumple

Dato Número	Tiempo	Parámetro 1	Parámetro 2	Tiempo Confiabilidad Calculado MTBM <sub>c</sub> o MTBM <sub>p</sub>	βeta de Confiabilidad X 100	Bondades de Ajuste - Kolmogorov - Smirnov			Bondades de Ajuste - Anderson & Darling		
		βeta de Confiabilidad	η - Eta			Valor Prueba Real	Valor Crítico	Cumple o No	Valor Prueba Real	Valor Crítico	Cumple o No
61	1223.0286	7.552362798	1020.013934	957.8661619	755.2362798	0.00807222	0.15620499	Cumple	0.775384463	0.637	No Cumple
62	1264.0571	7.421125396	1026.158657	962.787	742.1125396	0.00211296	0.15494015	Cumple	0.808770404	0.637	No Cumple
63	1278.8000	7.289702248	1032.428849	967.7917185	728.9702248	0.00246753	0.15370555	Cumple	0.855539802	0.637	No Cumple
64	1306.6857	7.146823019	1039.118603	973.0751668	714.6823019	0.00502495	0.1525	Cumple	0.910961042	0.637	No Cumple
65	1308.2857	7.018923666	1045.600631	978.2313324	701.8923666	0.0026502	0.15132238	Cumple	0.98422173	0.637	No Cumple
66	1309.8857	6.904652548	1051.877294	983.2618575	690.4652548	4.9049E-05	0.15017162	Cumple	1.066101985	0.637	No Cumple
67	1311.4857	6.802322395	1057.957783	988.170699	680.2322395	0.00302821	0.14904672	Cumple	1.151127736	0.637	No Cumple
68	1313.0857	6.710391538	1063.852439	992.9623298	671.0391538	0.00624129	0.14794673	Cumple	1.236192744	0.637	No Cumple
69	1314.6857	6.627525669	1069.571483	997.6413017	662.7525669	0.00964373	0.14687074	Cumple	1.319648452	0.637	No Cumple
70	1316.2857	6.552587079	1075.124625	1002.212086	655.2587079	0.01319416	0.14581789	Cumple	1.400730657	0.637	No Cumple
71	1317.8857	6.484608758	1080.520942	1006.679008	648.4608758	0.01685536	0.14478736	Cumple	1.479201263	0.637	No Cumple
72	1332.6286	6.416447726	1086.012447	1011.219284	641.6447726	0.01462478	0.14377838	Cumple	1.540286261	0.637	No Cumple
73	1334.2286	6.353933316	1091.36179	1015.662067	635.3933316	0.018208	0.1427902	Cumple	1.601436986	0.637	No Cumple
74	1335.8286	6.296684898	1096.572286	1020.009701	629.6684898	0.02186255	0.14182212	Cumple	1.662466368	0.637	No Cumple
75	1337.4286	6.244205961	1101.649642	1024.265382	624.4205961	0.02556118	0.14087347	Cumple	1.72326928	0.637	No Cumple
76	1339.0286	6.196024766	1106.599844	1028.432407	619.6024766	0.02928129	0.1399436	Cumple	1.783844479	0.637	No Cumple
77	1380.0571	6.13689438	1112.094159	1032.995405	613.689438	0.01420359	0.1390319	Cumple	1.793915458	0.637	No Cumple
78	1381.6571	6.081464959	1117.471939	1037.472742	608.1464959	0.01745853	0.1381378	Cumple	1.810824623	0.637	No Cumple
79	1383.2571	6.030021612	1122.727042	1041.863148	603.0021612	0.02079517	0.13726072	Cumple	1.833671409	0.637	No Cumple
80	1263.2571	6.031571886	1125.697245	1044.634261	603.1571886	0.0225641	0.13640015	Cumple	1.795173029	0.637	No Cumple
81	1412.7429	5.976739093	1131.161415	1049.174552	597.6739093	0.01432389	0.13555556	Cumple	1.787121416	0.637	No Cumple
82	1414.3429	5.925314183	1136.513491	1053.633207	592.5314183	0.01738821	0.13472646	Cumple	1.788665211	0.637	No Cumple
83	1442.2286	5.868756741	1142.165428	1058.307753	586.8756741	0.0112251	0.1339124	Cumple	1.7711727	0.637	No Cumple
84	1496.4000	5.797179471	1148.550031	1063.494298	579.7179471	0.00140882	0.13311291	Cumple	1.723084537	0.637	No Cumple
85	1537.4286	5.715389843	1155.45806	1069.038428	571.5389843	0.00219751	0.13232758	Cumple	1.673839652	0.637	No Cumple
86	1604.7429	5.613977356	1163.319454	1075.226604	561.3977356	0.00582663	0.13155598	Cumple	1.625165879	0.637	No Cumple
87	1606.3429	5.520697826	1171.014001	1081.31231	552.0697826	0.00474944	0.13079773	Cumple	1.621291127	0.637	No Cumple
88	1621.0857	5.430850862	1178.74295	1087.434385	543.0850862	0.00437855	0.13005244	Cumple	1.643636873	0.637	No Cumple
89	1635.8286	5.344454896	1186.500714	1093.590049	534.4454896	0.00399671	0.12931974	Cumple	1.68586518	0.637	No Cumple
90	1637.4286	5.265479229	1194.078662	1099.636975	526.5479229	0.00261481	0.12859929	Cumple	1.74724714	0.637	No Cumple
91	1691.6000	5.177870033	1202.28687	1106.129725	517.7870033	0.00480457	0.12789075	Cumple	1.803033029	0.637	No Cumple
92	1732.6286	5.086189549	1210.919249	1112.925999	508.6189549	0.0055163	0.12719379	Cumple	1.867176071	0.637	No Cumple
93	1734.2286	5.002444417	1219.359347	1119.609271	500.2444417	0.00453991	0.12650811	Cumple	1.953146407	0.637	No Cumple
94	1801.5429	4.908865994	1228.585803	1126.848921	490.8865994	0.00598091	0.12583339	Cumple	2.035081526	0.637	No Cumple

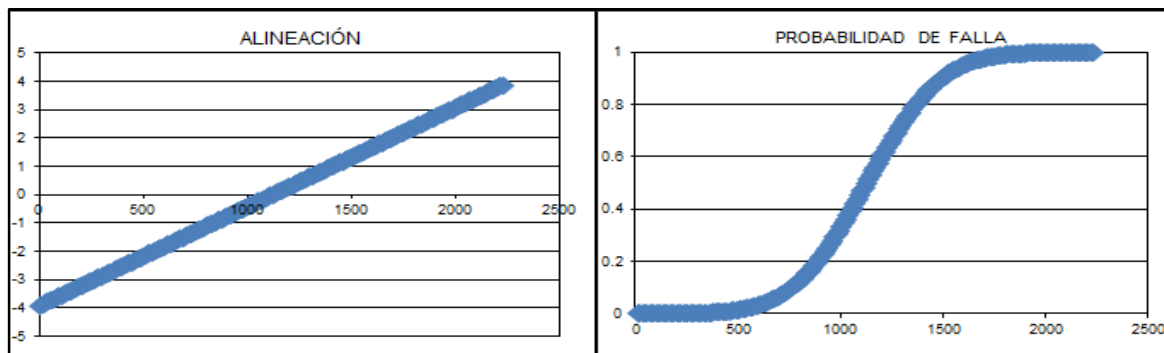


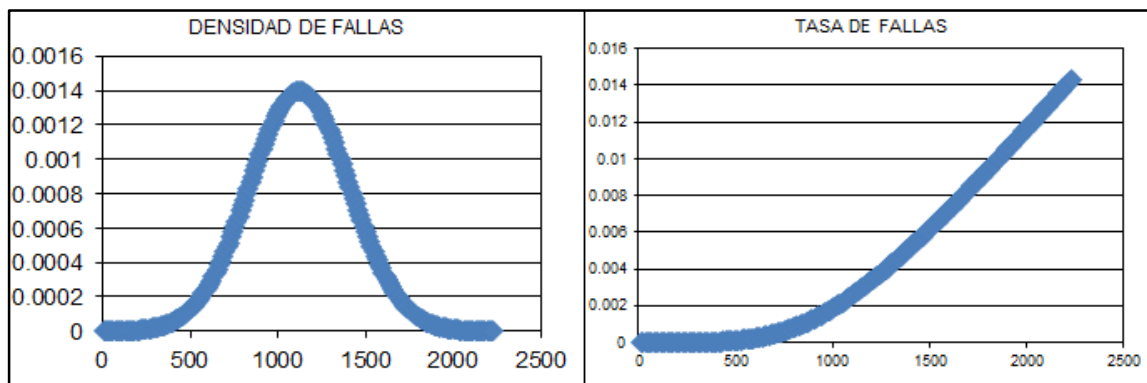


En los LED del análisis secuencial se deduce que el  $\beta$  es siempre muy alto, entre 5.6 y 4.9, lo que es característico de Fase III Davies, las curvas características de Tasa y de Probabilidad de fallas la curva de densidad se asemeja a un comportamiento de distribución Normal, la alineación tiene pendiente positiva y los valores de la Bondad de Ajuste K-S siempre cumplen, más no así con A-D (Anderson – Darling); todo esto demuestra que los bombillos LED son siempre en su vida útil Fase III de Davies de envejecimiento.

Los LED en el programa BaseCMD con Distribución Normal, muestran:

Ilustración 64 - Curvas de LED con BaseCMD de Distribución Normal



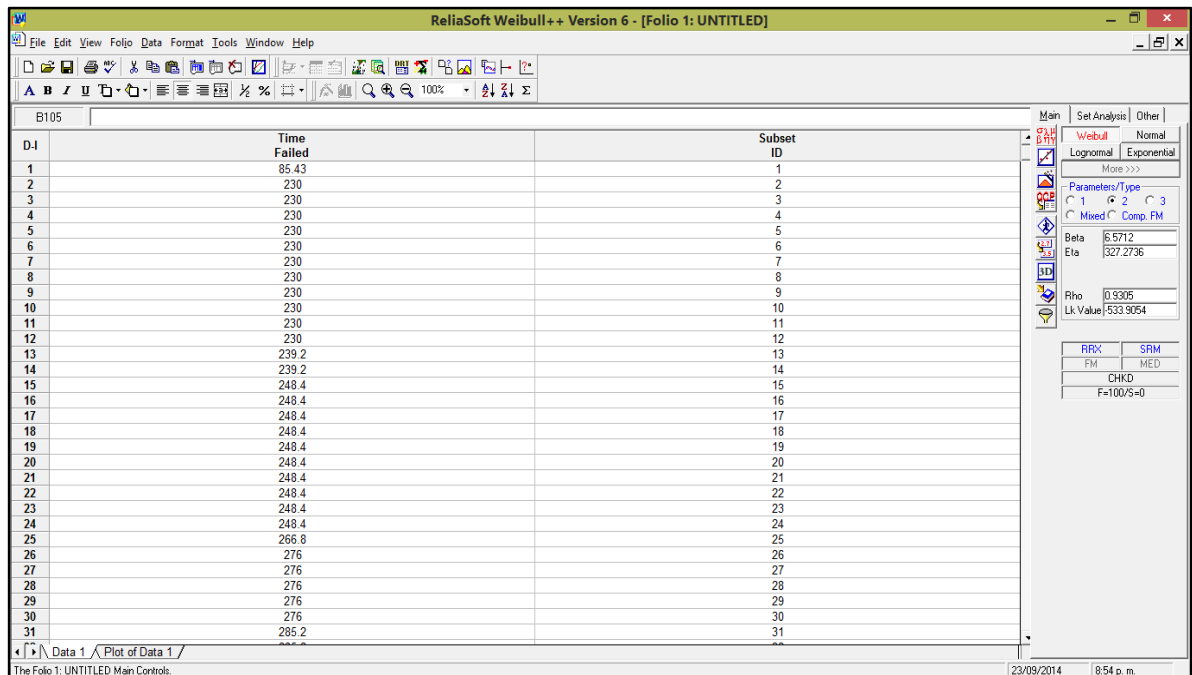


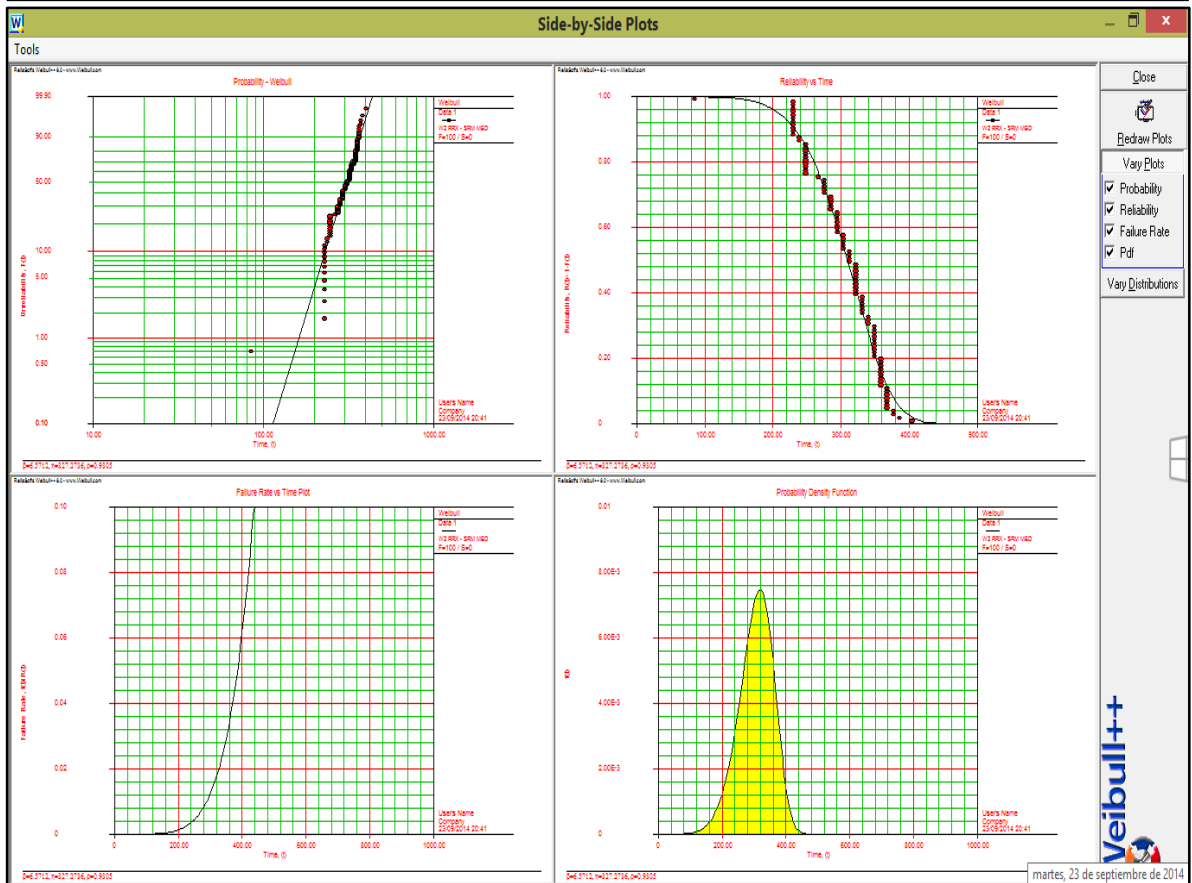
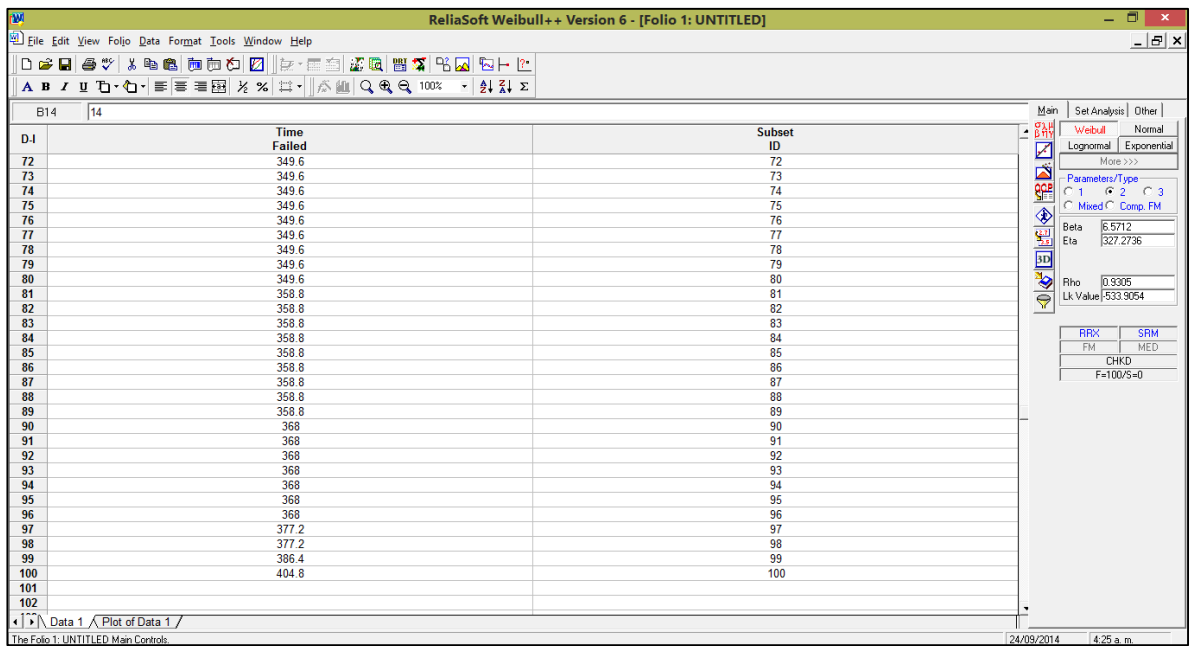
Las curvas de Tasa de fallas, probabilidad de Fallas y de Alineación son crecientes, en especial la curva de Hazard es típica de Fase III de Davies, la distribución de las fallas se asimila a una Normal, lo que permite concluir con Normal que los LED en su forma de fallar se comportan en Fase III Davies.

#### 4.3.2.4 Estudio de los bombillos incandescentes de Lote Inicial Ciclo 1 con distribución Weibull del Programa ReliaSoft Weibull ++ Versión 6

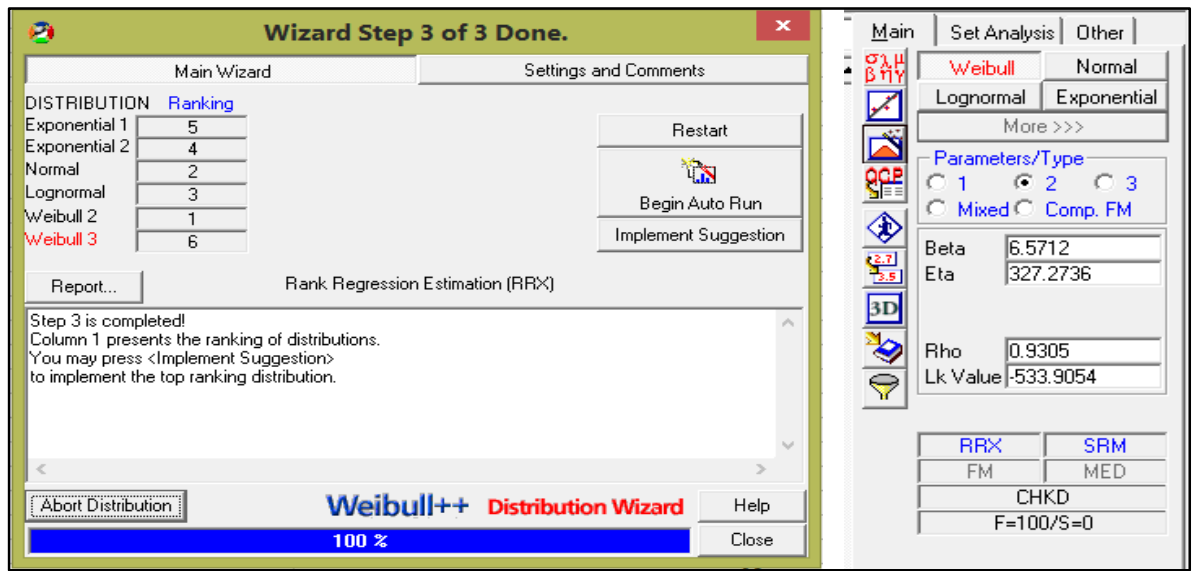
Al aplicar el programa ReliaSoft en los Bombillos en estado de falla del Ciclo 1 Incandescentes, con distribución Weibull de dos parámetros, se obtienen los resultados que se muestran a continuación.

Ilustración 65 - Análisis Bombillos Ciclo 1 Weibull ReliaSoft Weibull ++ Versión 6





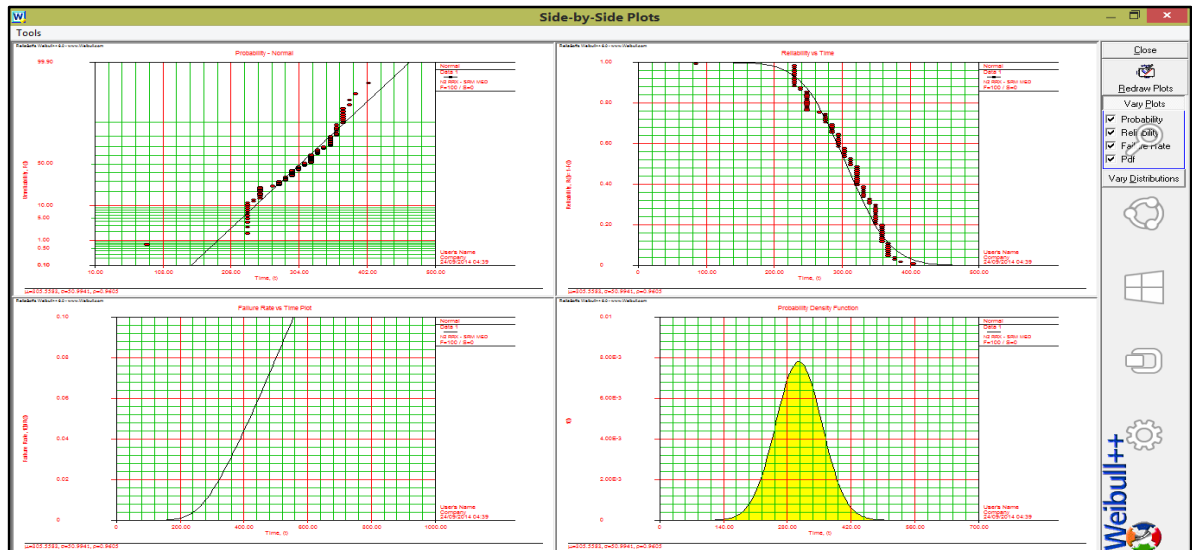




El comportamiento muestra que la Tasa de Fallas es creciente, típica de Fase III de Weibull, la Curva de supervivencia  $R(t)$  es decreciente lo que implica tácitamente que  $F(t)$  es creciente, la forma de la curva de densidad de fallas es similar a una Normal, los valores de K-S está bien.

Los valores de  $\beta$  son sobre 6.5, lo cual lo tipifica como Fase III Davies, los mejores modelos de distribución son en su orden Weibull de dos parámetros y Normal, lo cual verifica de manera concluyente que los Bombillos Incandescentes ciclo 1 son Fase III.

Ilustración 66 - Análisis Ciclo 1 Distribución Normal ReliaSoft Weibull ++Versión 6



Nuevamente en la Distribución Normal, el comportamiento de las curvas de Tasa, Probabilidad y Densidad de fallas, como en la Alineación ratifica conductas de fallas

de vida útil por envejecimiento Fase III Davies.

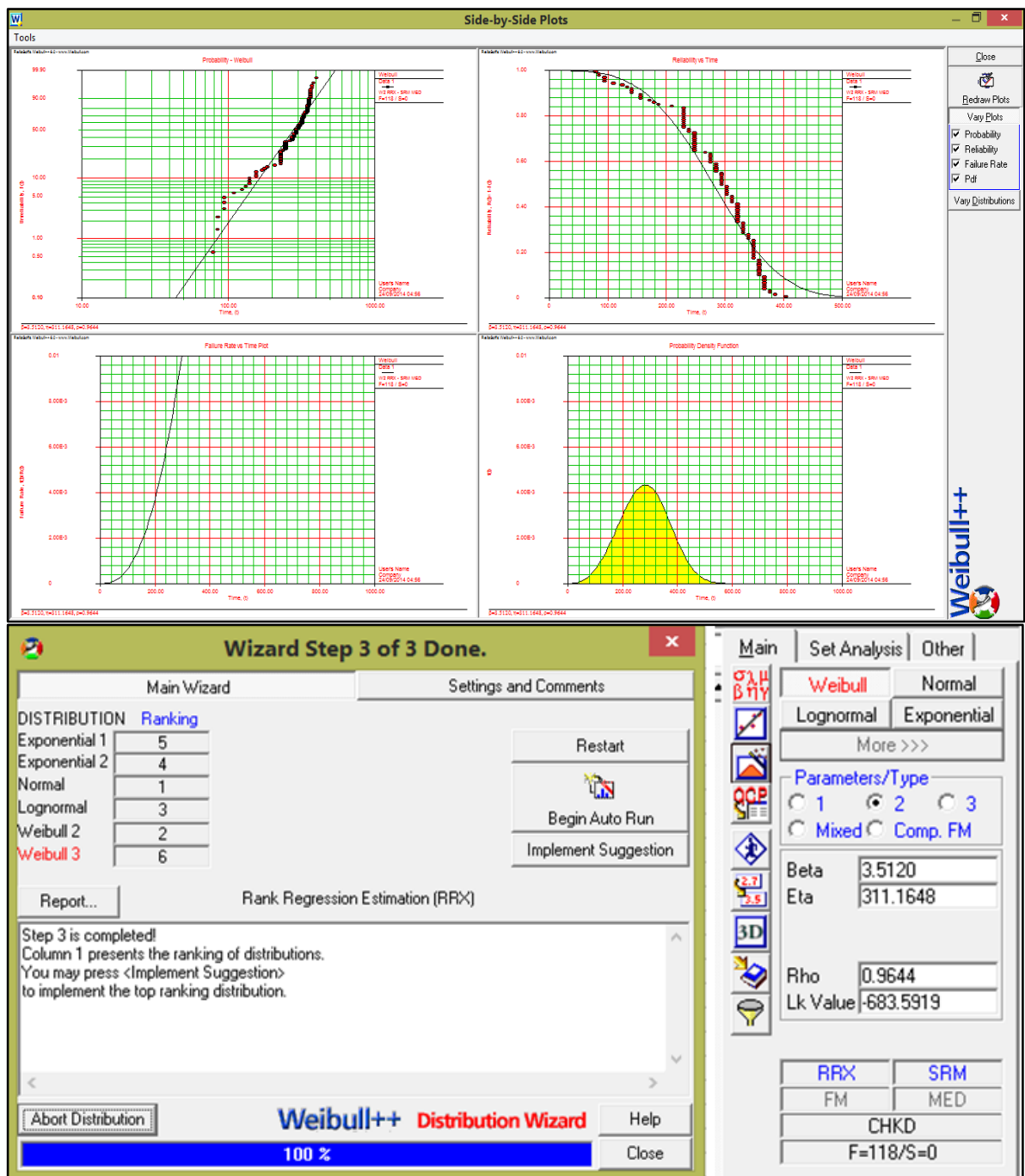
#### 4.3.2.5 Estudio de los bombillos incandescentes de Lote Inicial Ciclos 1 y 2 con distribución Weibull del Programa ReliaSoft Weibull ++ Versión 6

Con el programa ReliaSoft en los Bombillos en estado de falla de los Ciclos 1 y 2 Incandescentes, usando distribución Weibull de dos parámetros, se obtienen los resultados que se muestran a continuación.

Ilustración 67 - Análisis Bombillos Ciclos 1 - 2 Weibull ReliaSoft Weibull++Versión 6

D-I	Time Failed	Subset ID
1	79.33	1
2	85.43	2
3	85.67	3
4	94.67	4
5	94.67	5
6	94.67	6
7	110	7
8	125.33	8
9	133	9
10	140.67	10
11	140.67	11
12	140.67	12
13	156	13
14	156	14
15	156	15
16	171.33	16
17	179	17
18	186.67	18
19	209.67	19
20	230	20
21	230	21
22	230	22
23	230	23
24	230	24
25	230	25
26	230	26
27	230	27
28	230	28
29	230	29
30	230	30
31	239.2	31

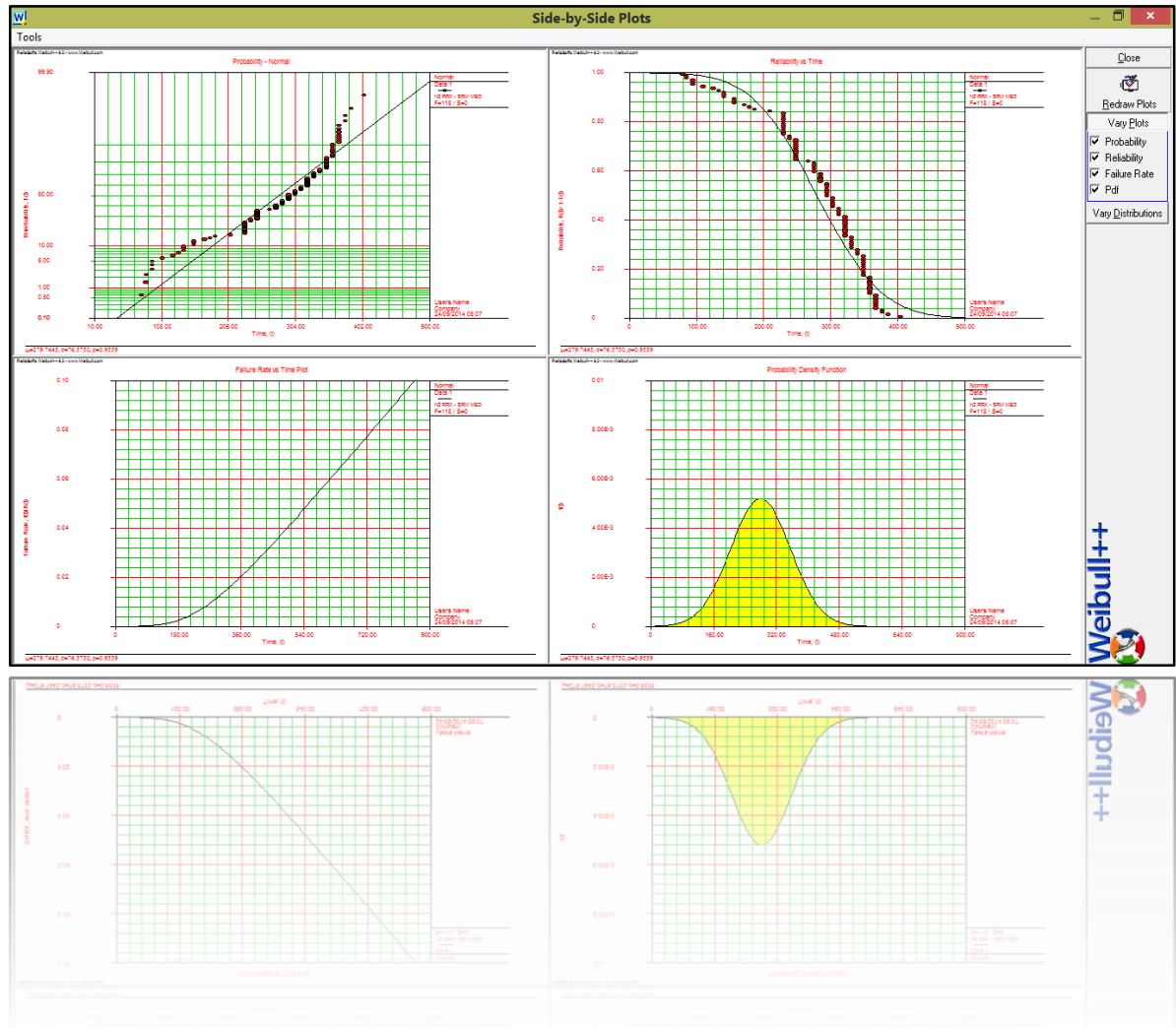
D-I	Time Failed	Subset ID
89	349.6	89
90	349.6	90
91	349.6	91
92	349.6	92
93	349.6	93
94	349.6	94
95	349.6	95
96	349.6	96
97	349.6	97
98	349.6	98
99	358.8	99
100	358.8	100
101	358.8	101
102	358.8	102
103	358.8	103
104	358.8	104
105	358.8	105
106	358.8	106
107	358.8	107
108	368	108
109	368	109
110	368	110
111	368	111
112	368	112
113	368	113
114	368	114
115	377.2	115
116	377.2	116
117	386.4	117
118	404.8	118
119		



El comportamiento con Distribución Weibull de dos parámetros, de los Incandescentes Ciclos 1 y 2, ratifica en todos sus parámetros de: Tasa de fallas, alineación y Distribución de fallas (semejante a una distribución Normal) crecientes, Curva de supervivencia  $R(t)$  (decreciente) con  $F(t)$  (tácita) creciente, un  $\beta$  igual a 3.51, con funciones de distribuciones Normal y Weibull de 2 parámetros como las dos mejores que simulan a  $\lambda$  de fallas, consolidan y ratifican nuevamente a los bombillos incandescentes de Ciclo 1 y 2, como elementos que se comportan como

los de Fase III Zona 3 de la curva de Davies.

Ilustración 68 - Análisis de Ciclos 1 y 2 con Distribución Normal de ReliaSoft Weibull ++ Versión 6

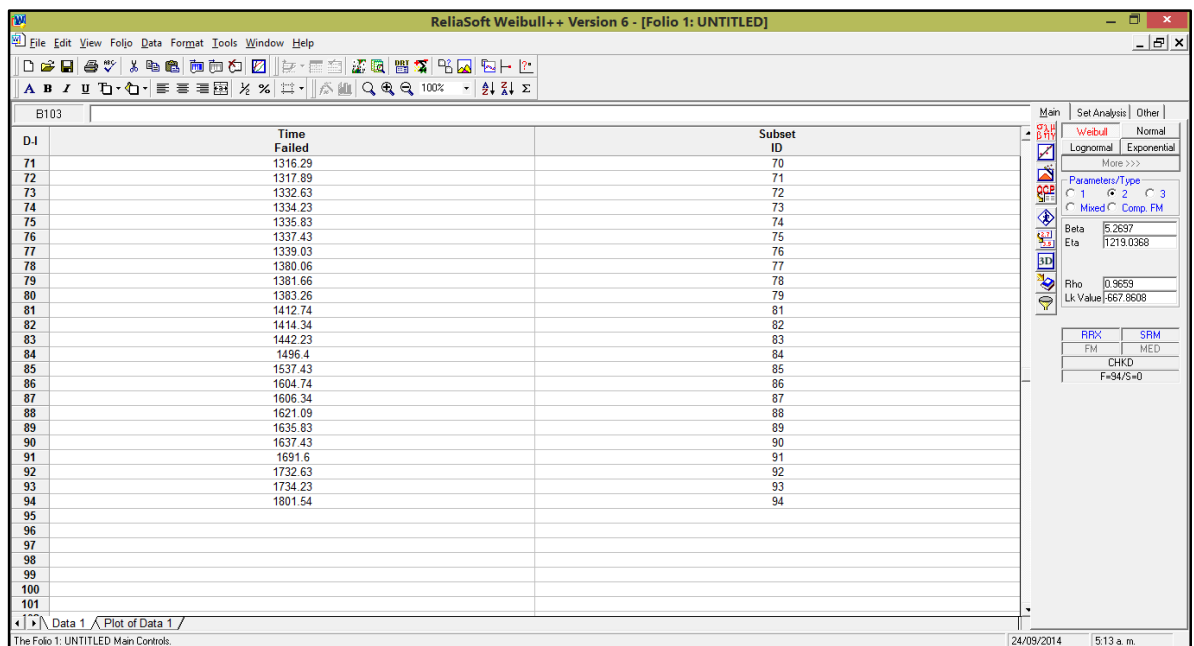
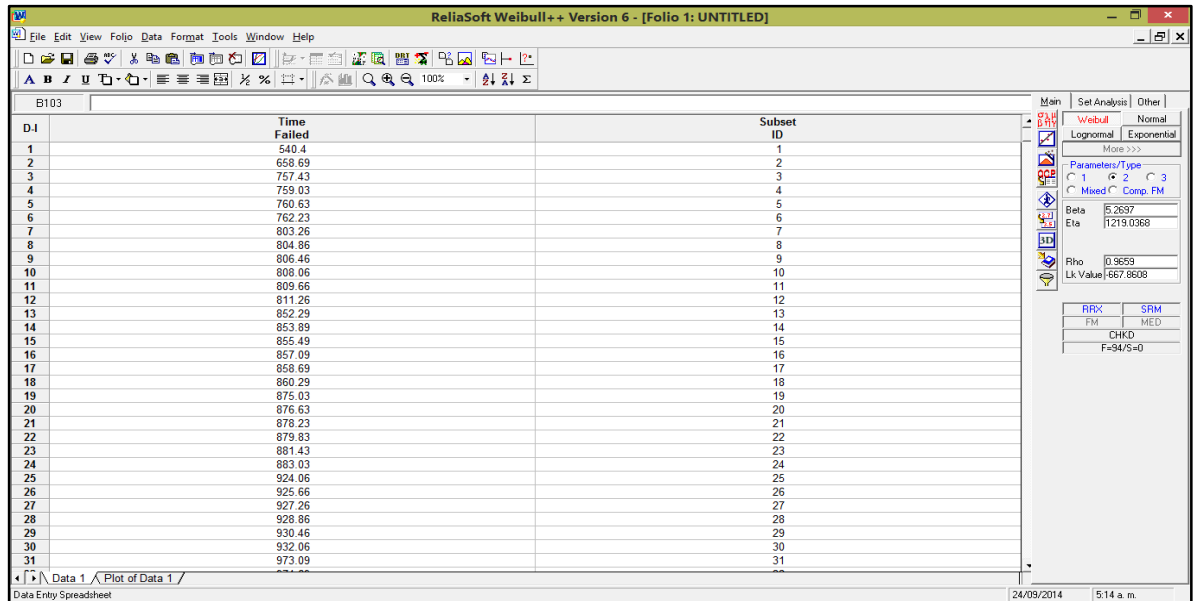


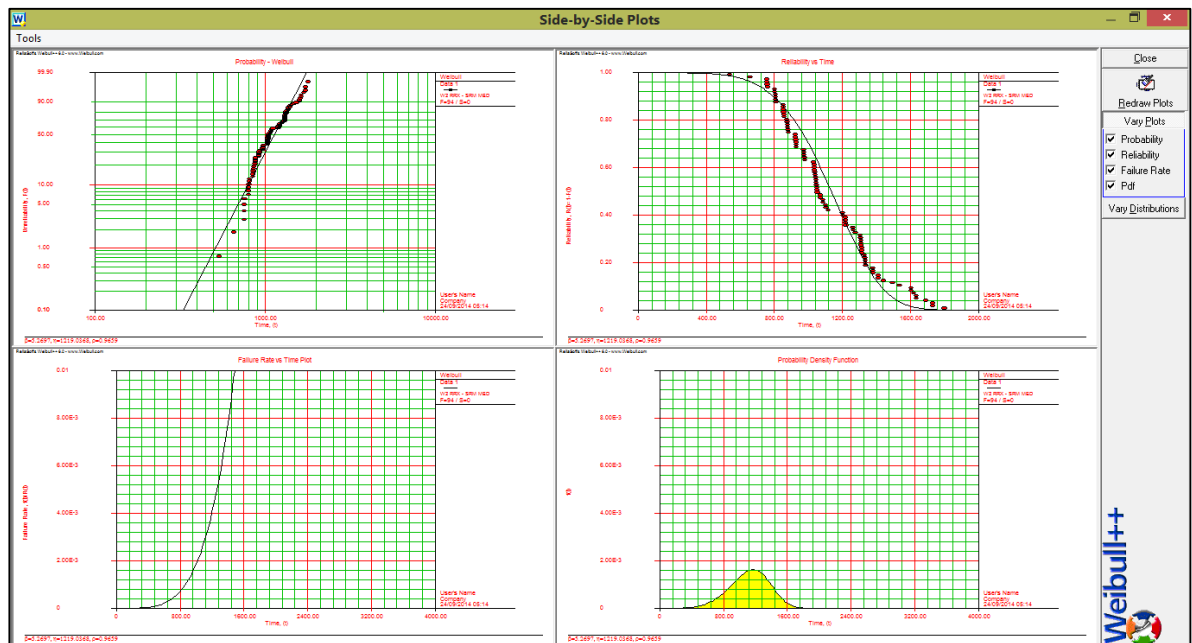
Otra vez en los Incandescentes Ciclos 1 y 2, con la Distribución Normal, el comportamiento de las curvas de Tasa, Probabilidad y Densidad de fallas, como en la Alineación reafirma un comportamiento de fallas de vida útil por envejecimiento Fase III Davies.

#### 4.3.2.6 Estudio de los bombillos LED con distribución Weibull del Programa ReliaSoft Weibull ++ Versión 6

En el programa ReliaSoft en los Bombillos LED en estado de falla, usando distribución Weibull de dos parámetros, muestra los resultados que se detallan en los siguientes párrafos.

## Ilustración 69 - Análisis Bombillos LED con Weibull de ReliaSoft Weibull++ Versión 6





**Wizard Step 3 of 3 Done.**

**Main Wizard**

DISTRIBUTION	Ranking
Exponential 1	6
Exponential 2	5
Normal	3
Lognormal	1
Weibull 2	4
Weibull 3	2

Buttons: Report..., Restart, Begin Auto Run, Implement Suggestion

Rank Regression Estimation (RRX)

Step 3 is completed!  
Column 1 presents the ranking of distributions.  
You may press <Implement Suggestion>  
to implement the top ranking distribution.

**Weibull++ Distribution Wizard**

100 %

**Settings and Comments**

Main | Set Analysis | Other

**Weibull** | Normal

Lognormal | Exponential

More >>>

**Parameters/Type**

1 | 2 | 3

Mixed | Comp. FM

Beta: 5.2697  
Eta: 1219.0368

Rho: 0.9659  
Lk Value: -667.8608

RRX | SRM

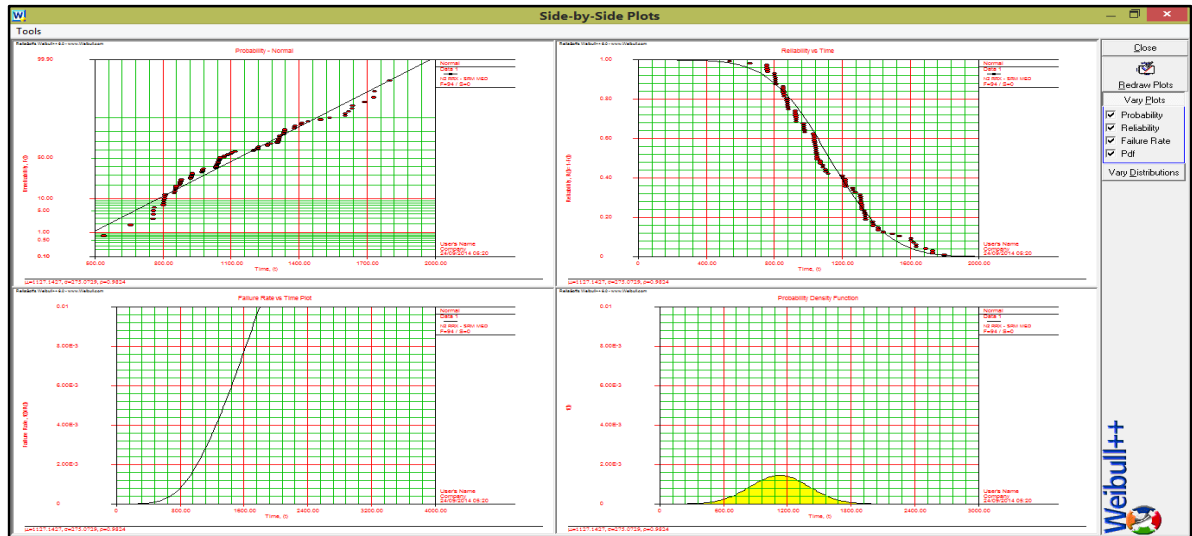
FM | MED

CHKD

F=94/S=0

El comportamiento con Distribución Weibull de dos parámetros, de los LED, demuestra que son Fase III en todos sus parámetros de: Tasa de fallas, alineación y Distribución de fallas (semejante a una distribución Normal) que son crecientes, la Curva de supervivencia  $R(t)$  (decreciente) deriva en una  $F(t)$  (tácita) creciente, un  $\beta$  igual a 5.26, con las funciones de distribuciones Log Normal, Normal y Weibull como las mejores que simulan la forma de la Tasa de fallas, con lo que se asegura otra vez a los bombillos LED como Fase III Zona 3 Davies.

## Ilustración 70 - Análisis de LED con Distribución Normal de ReliaSoft Weibull ++ Versión 6

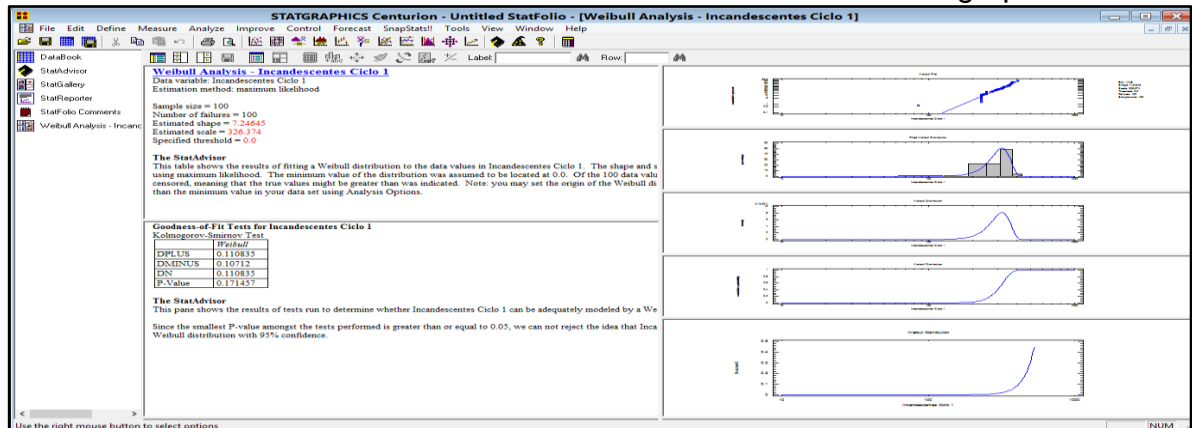


Los LED en la Distribución Normal, ratifican su comportamiento en sus curvas de Tasa, Distribución, Alineación y probabilidad de fallas, que son Fase III.

### 4.3.2.7 Estudio de los bombillos incandescentes de Lote Inicial Ciclo 1, Ciclo 2 y LED con programa Statgraphics Centurión XV con Distribución Weibull

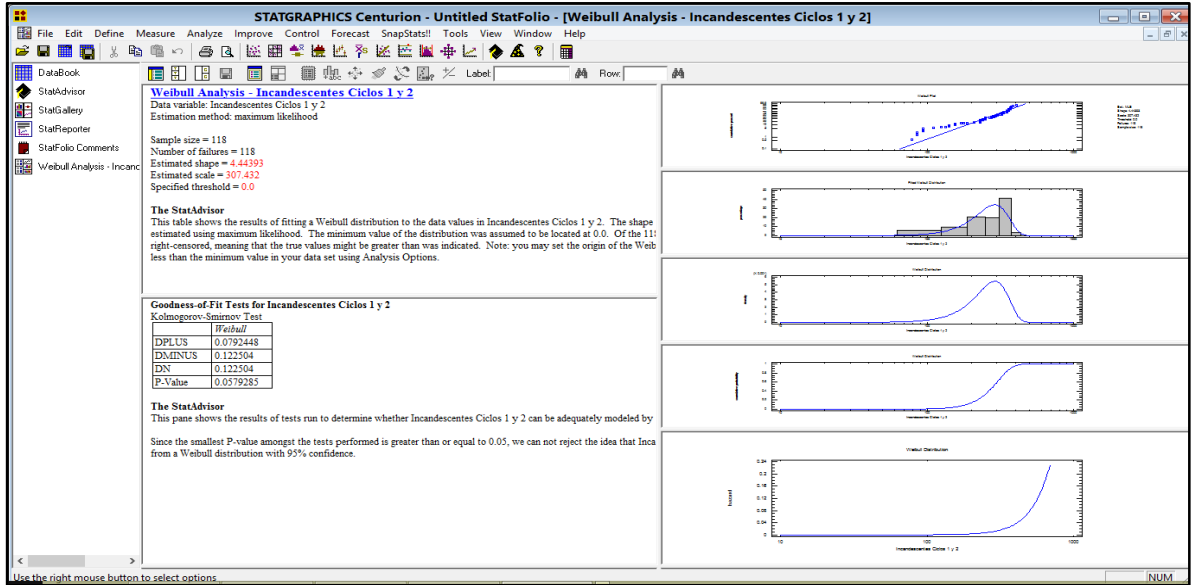
Los siguientes párrafos muestran los resultados numéricos y gráficos de las tres muestras de bombillas que fallan en los tres casos.

## Ilustración 71 - Incandescentes Ciclo 1 con análisis Weibull de Statgraphics



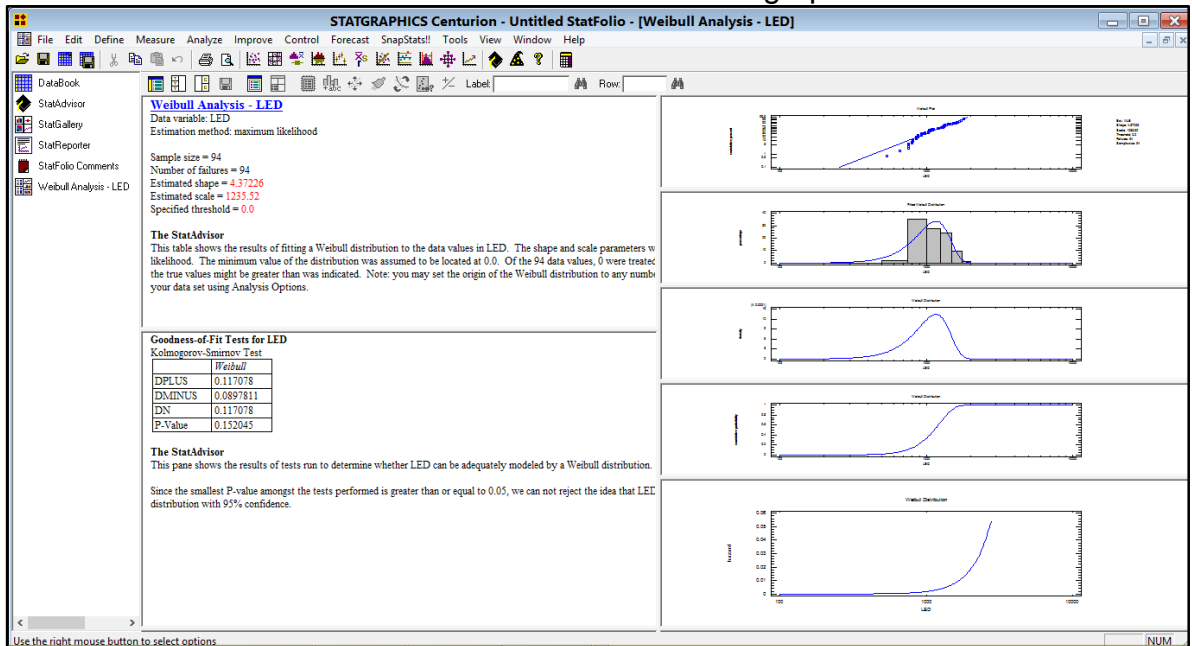
Las curvas de Tasa de Fallas, alineación y de Probabilidad de Fallas crecientes, la de Densidad e histograma simulan una distribución Normal, además de un  $\beta$  de 7.24 confirman que son de Fase III de Zona 3 de Davies.

## Ilustración 72 - Incandescentes Ciclos 1 y 2 con análisis Weibull de Statgraphics



Por lo que muestran las curvas de Tasa de Fallas, alineación y de Probabilidad de Fallas crecientes, la de Densidad e histograma simulan una distribución Normal, además de un  $\beta$  de 4.44 corroboran que Bombillos Incandescentes Ciclo 1 y 2 son de Fase III de Zona 3 de Davies.

## Ilustración 73 - Bombillos con análisis Weibull de Statgraphics



En la anterior ilustración se muestran las curvas de Tasa de Fallas, alineación y de Probabilidad de Fallas crecientes, la de Densidad e histograma asemejan una



distribución Normal, además de un  $\beta$  de 4.37 corroboran que los Bombillos LED pertenecen en su vida final útil a la Fase III de Zona 3 de Davies.

#### 4.3.3 Análisis cruzado

Las diferentes pruebas realizadas en las tres muestras con los tres programas informáticos, con las pruebas de validez estadística y estocástica que se realizan al interior del capítulo, de forma unánime se puede afirmar que los bombillos incandescentes y LED del Banco de pruebas fallan por vejez, en la Fase III Zona 3 de Davies.

#### 4.4 CONCLUSIONES DE CAPÍTULO

La sección logra demostrar con validez estadística, matemática, estocástica, gráfica y numérica, utilizando los criterios internacionalmente aceptados en confiabilidad y parametrización de la misma que el comportamiento de la vida útil, de las tres muestras utilizadas (Incandescentes Ciclo 1 y 2 y los LED), tienen un comportamiento de Fase III Zona 3 de la Curva de Davies, con Tasas de fallas crecientes, con Probabilidad de fallas en aumento y Densidad de fallas con una conducta asimilable a la Distribución Normal con Betas de Weibull superiores a 1.5 y en ocasiones bastante altos.

Por lo anterior se alcanza la totalidad del objetivo del capítulo cuarto, con la demostración de que los bombillos de frenado de vehículos, alusivos a la investigación fallan por fatiga de vejez.

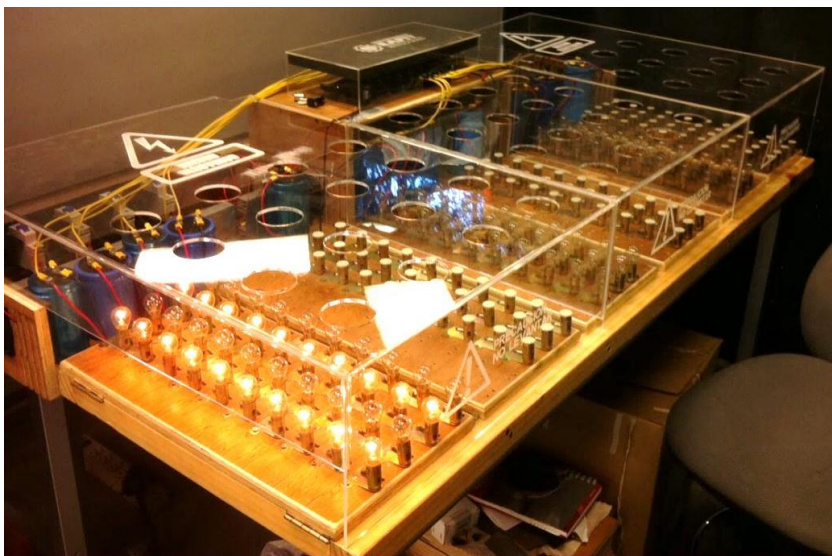
## 5 CONCLUSIONES

### 5.1 CONCLUSIONES DERIVADAS DEL BANCO DE PRUEBAS

Se logró construir un banco de pruebas prototipo, con la capacidad de doscientas posiciones de bombillos para luz de vehículo, con capacidad para funcionamiento en simultáneo bajo algoritmos de programación ejecutados por un Arduino (micro controlador con entorno de hardware), en el cual se pueden realizar cualquier tipo de programaciones de simulación. El banco se equipa con mecanismos de protección para apagado inmediato del banco o para descargas de corriente inusuales en el sistema.

El banco de pruebas, da como resultado un modelo de sistema de simulación coherente y muy aproximado a las condiciones específicas de trabajo de los bombillos, las variables incidentes como voltaje, amperaje y potencia de diseño que se adoptan de los parámetros que se encuentran en los vehículos, se incorporan directamente en el sistema de experimentación.

Ilustración 74 – Banco de Pruebas en funcionamiento



El módulo de pruebas logra mantener las mismas condiciones de trabajo tanto para un bombillo como para el total de su capacidad (200 Unidades), con lo que se logra un trabajo en simultáneo, de lo que representaría al menos doscientos vehículos de prueba.

El modus operandi del banco de pruebas permite una visualización muy clara e independiente de cada muestra, por lo que se puede identificar fácilmente el tiempo y el modo de falla, lo que permite identificar algunos modos que no estaban previstos sobre todo en los bombillos de tipo LED.

### 5.2 CONCLUSIONES TÉCNICAS

El banco de pruebas logra simular el contexto de trabajo de los bombillos, con lo que se genera el deterioro y envejecimiento de los componentes como se esperaba, sin ningún tipo de fallas por mortalidad infantil, y al presente día sin mortalidad durante el rodaje o madurez.

La estimación del ciclo de vida de los bombillos y su ubicación en la curva de Davies

es valedera, ya que según los análisis de todos los casos, la muestra mínima que se calcula es superada, para un error de precisión mínimo del 1%, el cual es un valor de estimación bueno para el tipo de análisis de la investigación.

Comprobar que las fallas del bombillo de freno no son aleatorias, ratifica que estos se encuentran en una zona diferente a la 2 de Davies, esta pruebas se realizan a las tres poblaciones, y en los tres casos, los diagramas muestran que las barras sobrepasan significativamente la banda de confianza, por lo que cumplen la prueba del ACF, lo que expresa contundentemente que se correlacionan entre sí, tienen pendiente activa y no son aleatorios.

El comportamiento de la Tasa de Fallas creciente, la densidad de fallas con una distribución normal, el indicador de Bondad de Ajuste K-S bueno, que la alineación sea creciente en su pendiente, que el parámetro  $\beta$  en Weibull sea siempre mayor a 2, y que la Probabilidad de falla individual siempre es creciente, son comportamientos o síntomas que permiten asegurar que un elemento es característico de la Fase III Davies, las cuales son manifestaciones que se identifican en los tres análisis que se realizan a los datos experimentales.

Se consigue demostrar con validez estadística, matemática, estocástica, gráfica y numérica, mediante la utilización de los criterios internacionalmente aceptados en confiabilidad y parametrización de la misma, que el comportamiento de la vida útil, de las tres poblaciones que se utilizan, tienen un comportamiento de Fase III de la Curva de Davies, con Tasas de fallas crecientes, con Probabilidad de fallas en aumento y Densidad de fallas con una conducta asimilable a la Distribución Normal con Betas de Weibull superiores a 2.

Se alcanza totalmente a demostrar, con una población numéricamente valedera, con un porcentaje de error por debajo del 5%, que los bombillos de frenado de vehículos, alusivos a la investigación fallan por la fatiga que se debe al envejecimiento.

Se logra determinar que las distribuciones que más se ajustan al comportamiento de los de los bombillos de frenado automotriz, son la normal y Weibull, cuyos parámetros de estimación dan valores de ajuste muy buenos y las distribuciones de probabilidad, densidad y tasa de fallas, son propias de la distribución normal y de la fase tres de Davies, la cual es propia Weibull cuando el beta es superior a dos.

Se logra el fin de precisar la estimación temprana y previa de los ciclos de vida y garantías de uso de los bombillos de freno automotrices, a partir de análisis estadístico y de distribuciones.

La investigación permite analizar el comportamiento de la vida útil de bombillos de freno automotrices, y poder deducir que la mejor distribución estadística que modela su comportamiento es la distribución normal, como se aprecia en los análisis de los datos en capítulos anteriores, sin embargo para llegar a este tipo de conclusiones

se debe verificar previamente con una distribución que trabaje sobre toda la curva, que corrobore su comportamiento y entregue parámetros que verifiquen su ubicación en Davies como Weibull y Hjorth, para luego elegir una distribución más propensa que se acomode solamente a una parte específica de la gráfica y realizar posteriores análisis,.

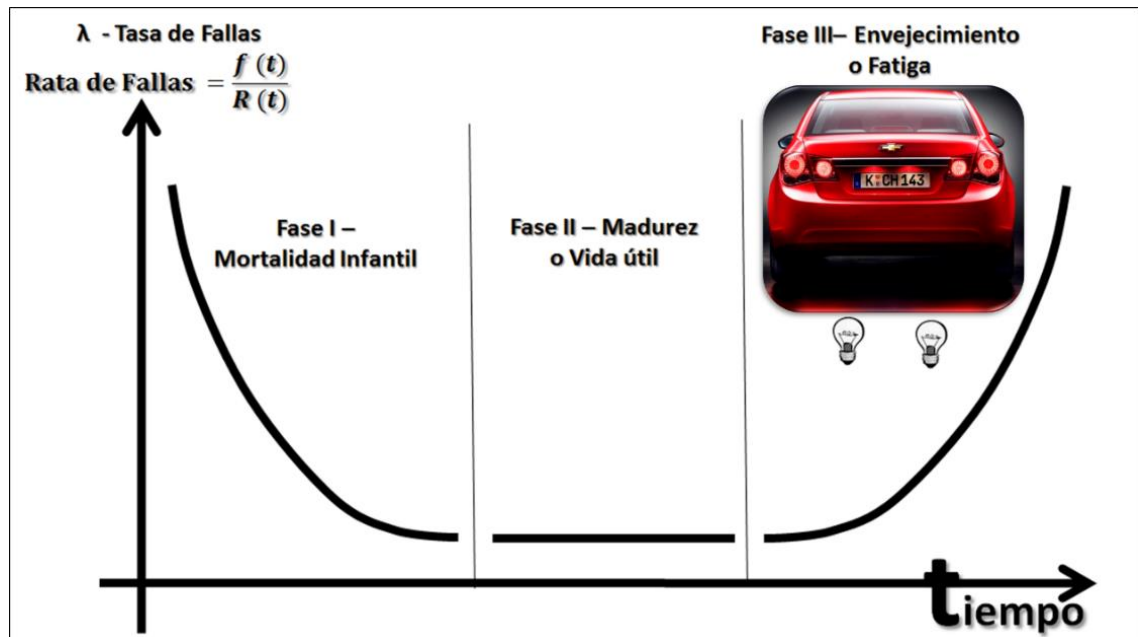
### 5.3 CONCLUSIONES GENERALES

Se dejan las bases técnicas suficientes, de manera explícita, para que el lector o usuario del proyecto, pueda manejar con soltura el desarrollo y cálculos de la investigación.

Se da explícitamente una descripción en términos de los elementos de la investigación de conceptos como, las funciones de densidad, de tasa, de probabilidades de fallas, como los tipos de alineación o no y demás parámetros como bondades de ajuste, etcétera, los cuales son los elementos de juicio, para la interpretación y el análisis de los diferentes resultados experimentales y estudios estadísticos con distribuciones, de las bombillas de frenado automotriz, en los cuales se lanza la hipótesis de que sobreviven hasta la zona de fatiga, desgaste o envejecimiento en la Curva de Davies.

Se deja constancia de todas las opciones de iluminación para denotar y destacar la acción de frenado con iluminación en los vehículos que transitan habitualmente por las redes viales nacionales y mundiales.

Ilustración 75 - Ubicación en curva de Davies de los bombillos de frenado automotriz



Se proporcionan los principios técnicos y físicos de funcionamiento, la evolución y

la tendencia futura en el tiempo, de los bombillos en las dos versiones que se estudian, aparte de que se destaca en especial la alta incidencia en la accidentalidad que pueden generar al no funcionar adecuadamente.

El proyecto demuestra con suficiencia, con argumentos técnicos y experimentales, en contexto con las reglas de cumplimiento estadístico y validez experimental que los bombillos de frenado, si fallan por envejecimiento, a través de las diferentes exposiciones y cálculos numéricos.

Tabla 6 - Tiempo de duración de las bombillas de vehículo

PROGRAMA	TIPO BOMBILLO	DISTRIBUCIÓN	VIDA MEDIA Horas	Variación	Promedio	% Variación
Weibull ++	Incandescente	Normal	311,18	20,53	324,04	6,34
Weibull ++	Incandescente	Weibull	327,27			
Statgraphics	Incandescente	Weibull	326,00			
Base CMD	Incandescente	Weibull	331,71			
Weibull ++	LED	Weibull	1219,00	16	1227,53	1,30
Base CMD	LED	Weibull	1228,58			
Statgraphics	LED	Weibull	1235,00			

La tabla anterior resume en horas, el tiempo de duración de las bombillas de vehículo cuando llegan a su tiempo de vejez con una forma de utilización normal, como se aprecia en la tabla, los valores de un programa a otro varían en un rango pequeño por lo que se pueden tomar como confiables.

Cabe anotar que la prueba experimental en laboratorio, excluye uno de los factores que puede ser incidente para que los bombillos fallen de manera más prematura, el cual es el factor de vibración en los vehículos. Ya que el banco de pruebas permanece en un mismo sitio, no genera este fenómeno en los bombillos, por lo que se puede concluir que un bombillo cerca de su punto de fatiga, puede fallar de forma más temprana debido a que la vibración puede causar fracturas del filamento o fallas en conexiones, previas a las que se dan si el bombillo estuviese en un sitio estático.

Este tipo de comprobación, es útil a la industria o al usuario del producto como tal, ya que destaca en especial la alta accidentalidad que pueden generar al no funcionar adecuadamente, pues los humanos ya lo conciben y lo entienden de manera casi intuitiva e irracional, que son limitantes de velocidad del vehículo que transita delante de su móvil; al igual el impacto que genera en la vida cotidiana y en la movilidad de los seres humanos.

## BIBLIOGRAFÍA

**Antonelli, Giorgio. 1995.** *Light Signs: A light path through posters and advertising.* Milan, Italy: Lupetti, : Lupetti, 1995.

**Bunn Graphics.** Homepage of the Centennial Bulb. [En línea] [Citado el: 10 de 02 de 2014.] <http://www.centennialbulb.org/>.

**CEI . 1988.** Norma 191. [aut. libro] Comisión Electrotécnica Internacional. *Normativa Comisión Electrotécnica Internacional.* 1988.

**Díaz, Matalobos - Ángel. 1992.** *Confiabilidad en mantenimiento.* Caracas : Ediciones IESA, C.A., 1992. pág. 110. ISBN: 980-271-068-2.

**Ebeling, Charles E. 2005.** *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering.* [ed.] Inc. Waveland Press. New York City : McGraw-Hill Science - Engineering - Math, 2005. pág. 576. ISBN: 1577663861.

*Estadística aplicada a los Sistemas & Confiabilidad en los Sistemas.* **Forcadas, Jorge - Feliu. 1983.** 4, Medellín : Revista SAI - Revista SAI Sociedad Antioqueña de Ingenieros y Arquitectos – En: Revista SAI. No.4 Vol.1 – Medellín – Colombia - 1983, 1983, Vol. 1, pág. 41.

**Forbes, Catherine, y otros. 2011.** *Statistical Distributions.* New Jersey. : John Wiley & Sons, Inc, 2011. ISBN 978-0-470-39063-4.

**Gagné@, Robert y Bloom, Benjamín. 2008.** Taxonomía de los Objetivos educativos y formativos de los seres humanos. *Modelos de procesamiento de la información de los humanos.* [En línea]  
[http://cmaps.conectate.gob.pa/servlet/SBReadResourceServlet?rid=1189491719498\\_981864839\\_519162&partName=htmltext](http://cmaps.conectate.gob.pa/servlet/SBReadResourceServlet?rid=1189491719498_981864839_519162&partName=htmltext), 21 de Septiembre de 2008. [Citado el: 21 de Septiembre de 2008.] Se conoce como la escala de niveles de objetivos de Bloom, Barret y Gagné. <http://www.scribd.com/doc/408060/Robert-Gagne>.

**Gago Calderón, Alfonso y Fraile Vilan, Jorge. 2012.** *ILUMINCAIÓN CON TECNOLOGÍA LED.* s.l. : Ediciones Paranifo S.A, 2012. ISBN 13: 978-84-283-3368-9.

**Galván, Blas - González, Carrión, Andrés - García, Nieves Martínez-Alzamora. 2013.** *Ingeniería de Fiabilidad.* [En línea] 2013.

**General Electric. 1980.** Form 1144-2205-R. [aut. libro] Lamp Business Division. *The Extraordinary Light Bulb: Its Parts and Assembly*. Cleveland, OH : circa , 1980.

**Leemis, Lawrence M. 1995.** *Reliability: Probabilistic Models and Statistical Methods*. New Jersey City : Editorial Prentice Hall International Series in Industrial and Systems Engineering, 1995. ISBN: 0-13-720517-1.

**Lewis, Elmer E. 1995.** *Introduction to Reliability Engineering*. Segunda. s.l. : Editorial John Wiley & Sons, Inc, 1995. pág. 435. ISBN: 0471018333.

**Mora, Alberto - Gutiérrez. 2009.** *Mantenimiento Industrial Efectivo*. Medellín : Coldi limitada, 2009. ISBN 978-958-98902-0-2.

**Mora, Luis Alberto - Gutiérrez. 2012.** *Mantenimiento Industrial Efectivo*. Envigado : Coldi Ltda, 2012. 978-958-98902-0-2.

—. **2012.** *Mantenimiento Industrial Efectivo*. Medellín : COLDI Ltda, 2012. 978-958-98902-0-2.

**Mora, Luis Alberto. 2009.** *Mantenimiento Industrial Efectivo*. Envigado : Coldi, 2009. ISBN 978-958-98902-0-2.

**O'Connor, Patrick D.T. 2002.** *Practical Reliability Engineering*. Cuarta. Stevenage : Wiley - Jhon Wiley & Son, 2002. pág. 540. ISBN: 0-470-84463-9.

**Rey, Sacristán Francisco. 1996.** *Hacia la excelencia en Mantenimiento*. [ed.] S.L. Tgp Hoshin. Madrid : Tgp Hoshin, S.L., 1996. pág. 411. ISBN 84-87022-21-9.

**Ricardo, David. 1817.** *On the principles of Political Economy and Taxation* . Inglaterra : Ayuso, 1817.

**Santesmases, Miguel - Mestre. 2003.** *DYANE 2 Diseño y análisis de encuestas en investigación social y de mercados*. Madrid – España : Ediciones Pirámide – Grupo Editorial Anaya, 2003. pág. 29. ISBN: 84-368-1557-2.

**Schneider Electric. 2000.** *Cuaderno Técnico nº 144*. 2000.